



TUGAS AKHIR - TM141585 (KE)

**SIMULASI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN 3  
DIMENSI DI SEKITAR *SINGLE-ELEMENT AIRFOIL*  
UNTUK *SPOILER* DEPAN MOBIL FORMULA SAE  
DENGAN VARIASI *REYNOLDS NUMBER***

Wahyu Nugroho  
2110 100 118

Dosen Pembimbing :  
Vivien Suphandani, ST., M.Eng., PhD

JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015



FINAL PROJECT - TM141585 (KE)

# **NUMERICAL SIMULATIONS OF 3 DIMENSIONAL FLOW CHARACTERISTICS OVER A SINGLE- ELEMENT AIRFOIL FOR FORMULA SAE FRONT SPOILER BY VARYING REYNOLDS NUMBER**

**Wahyu Nugroho**  
2110 100 118

Supervisor :  
**Vivien Suphandani, ST., M.Eng., PhD**


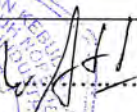

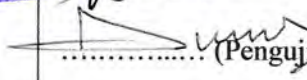
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Industrial Technology Faculty  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2015

**SIMULASI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN 3  
DIMENSI PADA *SINGLE-ELEMENT* AIRFOIL UNTUK  
SPOILER DEPAN MOBIL FORMULA SAE DENGAN  
VARIASI *REYNOLDS NUMBER***

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar  
Sarjana Teknik Pada Bidang Konversi Energi Program Studi S-1  
Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :  
Wahyu Nugroho  
NRP 2110 100 118

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir	
1. <u>Vivien Suphandani, ST, M.Eng, Ph.D</u> (NIP 198105292003122001 )	 ..... (Pembimbing)
2. <u>Dr Wawan Aries Widodo, ST., MT</u> ( NIP 197104051997021001 )	 ..... (Penguji 1)
3. <u>Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D</u> ( NIP 196412281990031002 )	 ..... (Penguji 2)
4. <u>Nur Ikhwan, ST., M.Eng</u> ( NIP 196709151995121001 )	 ..... (Penguji 3)

Surabaya  
Januari 2015



**SIMULASI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN 3  
DIMENSI DI SEKITAR *SINGLE-ELEMENT AIRFOIL*  
UNTUK *SPOILER* DEPAN MOBIL FORMULA SAE  
DENGAN VARIASI *REYNOLDS NUMBER***

**ABSTRAK**

**Nama Mahasiswa : Wahyu Nugroho**  
**NRP : 2110 100 118**  
**Jurusan : Teknik Mesin, FTI-ITS**  
**Dosen Pembimbing : Vivien Suphandani, ST., M.Eng., PhD**

*Formula student* adalah sebuah kompetisi membuat kendaraan di bawah naungan *society of Automotive Engineer (SAE)* internasional yang diikuti oleh mahasiswa seluruh dunia. Perlombaan ini diadakan di beberapa Negara antara lain Jepang, Jerman, Inggris, Italia, Brazil, Amerika, dan Australia. Ada dua kategori *event* yang harus diikuti peserta yaitu *static event* meliputi *design report*, *cost report*, dan *business logic* serta *dynamic event* meliputi *acceleration*, *skid pad*, *autocross*, *endurance*, dan *fuel efficiency*. Melihat banyak sekali lintasan beradius dalam *event skid pad*, *autocross* dan *endurance*, maka kemampuan mobil dalam *cornering speed* sangat menentukan waktu yang diperoleh. Seperti kita ketahui, mobil formula *single body* memiliki batasan *cornering speed* akibat *rolling* di lintasan beradius. Untuk itu diperlukan tambahan gaya tekan ke bawah untuk meningkatkan kemampuan *cornering speed*. Salah satu solusi untuk menambah gaya tekan ke bawah adalah menambahkan beberapa peralatan tambahan yang menggunakan prinsip aerodinamika. *Spoiler* depan dan belakang sering dijadikan pilihan peralatan tambahan dalam kasus ini. Oleh sebab itu perlu dilakukan penelitian tentang *spoiler* depan untuk menunjang performa mobil Sapuangin Speed di ajang FSAE.



Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode numerik (CFD) dengan perangkat lunak komersial, karena metode numerik dapat menampilkan hasil observasi dan visualisasi yang mendetail. Pemilihan kondisi simulasi digunakan model turbulensi *k-ε realizable*, *boundary condition* untuk *outlet* adalah *outflow* dan untuk *inlet* adalah *velocity inlet* dengan variasi *Reynolds number*. *Ground* merupakan *moving wall* dengan kecepatan sama dengan kecepatan *inlet*. Roda berputar dengan kecepatan *angular* sebesar kecepatan *inlet* dibagi radius roda.

Dari penelitian ini dapat diketahui karakteristik aliran 3D di sekitar *spoiler* Mobil FSAE dengan menggunakan *high lift-low Reynolds number airfoil*. Variasi *Reynolds number* tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap distribusi *C<sub>p</sub>* ditinjau dari perbandingannya pada tiap potongan  $z/s = 0.25$ ,  $z/s = 0.5$ , dan  $z/s = 0.81$ . *Side body effect*, yang mengakibatkan *tip vortices* terbentuk karena perbedaan tekanan di *upperside* dan *lowerside*, memberikan pengaruh pada distribusi tekanan di daerah sekitar *midspan*. Hasil simulasi menunjukkan variasi *Reynolds number* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap *downforce* yang dihasilkan, semakin besar *Reynolds number* maka *downforce* yang dihasilkan semakin besar. Namun, pengaruh *Reynolds number* terhadap koefisien *lift* (*C<sub>l</sub>*) tidak signifikan. Variasi *Reynolds number* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap gaya *drag* yang dihasilkan, semakin besar *Reynolds number* maka gaya *drag* yang dihasilkan semakin besar. Namun, pengaruh *Reynolds number* terhadap koefisien *drag* (*C<sub>d</sub>*) tidak signifikan. Keberadaan roda di belakang *spoiler* menyebabkan perbedaan *C<sub>l</sub>* hasil simulasi dengan perhitungan secara teoritis sebesar 24%.

**Kata Kunci :** *Spoiler, FSAE, cornering speed, high lift-low Reynolds number airfoil, velocity inlet, CFD, C<sub>p</sub>, C<sub>d</sub>, C<sub>l</sub>, side body effect.*



**NUMERICAL SIMULATIONS OF 3 DIMENSIONAL  
FLOW CHARACTERISTICS OVER A SINGLE-ELEMENT  
AIRFOIL FOR FORMULA SAE FRONT SPOILER BY  
VARYING REYNOLDS NUMBER**

**ABSTRACT**

**Student's name : Wahyu Nugroho**  
**NRP : 2110 100 118**  
**Major : Teknik Mesin, FTI-ITS**  
**Supervisor : Vivien Suphandani, ST., M.Eng., PhD**

*Formula student SAE is a race car building competition under International Society of Automotive Engineer (SAE) that followed by collegian all over the world. It is held annually in Japan, Germany, England, Italy, Brazil, America, and Australia. There are two kind of event in FSAE. They are static event including design report, cost report, and business logic, and dynamic event including acceleration, skid pad, autocross, endurance, and fuel efficiency. Since that the track consisted of many turning, it is important to consider the vehicle's cornering speed ability. A single-body vehicle has a limitation on cornering speed due to rolling. Therefore, vehicle requires additional downforce to increase the cornering speed. Adding aerodynamic devices is a one way to provide downforce. Rear spoiler and front spoiler are ones of a kind. Therefore, this research aims to improve the Sapuangan Speed performance in FSAE.*

*This study uses Computational Fluid Dynamic (CFD) method using commercial software to obtain visualization result. It uses  $k-\epsilon$  realizable turbulent model. The boundary condition for the inlet is velocity inlet and the boundary condition for the outlet is outflow. Ground is a moving wall as fast as inlet velocity. Front wheel angular velocity equals to inlet velocity divides by wheel radius.*



*As the result, Reynolds number variation does not significantly affect spoiler pressure coefficient ( $C_p$ ) distribution by comparing it on  $z/s = 0.25$ ,  $z/s = 0.5$ , and  $z/s = 0.81$  plane. Side body effect, in this case is tip vortices, emerges because of pressure difference on lowerside and upperside especially at the end of span. Downforce is increasing with higher Reynolds number, but the Reynolds number does not significantly affect lift coefficient ( $C_l$ ). The drag force is increasing with higher Reynolds number, but the Reynolds number does not significantly affect drag coefficient ( $C_d$ ). The effect of wheel behind the front spoiler resulted in a decrease of downforce by 24% compared to single front spoiler.*

**Keywords : Airfoil, CFD,  $C_d$ ,  $C_l$ ,  $C_p$ , Reynolds number, Spoiler.**



## KATA PENGANTAR

*Assalamu'alaikum, Alhamdulillah*, segala puji syukur Penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena atas kuasa-Nya laporan Tugas Akhir dengan judul :

**“SIMULASI NUMERIK KARAKTERISTIK  
ALIRAN 3 DIMENSI DI SEKITAR *SINGLE-ELEMENT*  
*AIRFOIL* UNTUK *SPOILER* DEPAN MOBIL  
FORMULA SAE DENGAN VARIASI *REYNOLDS*  
*NUMBER*”**

dapat diselesaikan sesuai tujuan utama yaitu mendekatkan diri pada Allah SWT melalui proses pembelajaran yang panjang.

Topik Tugas Akhir ini sengaja Penulis pilih atas dasar kekecewaan pada hasil akhir *event Student Formula Japan 2014*. Keikutsertaan ITS Team Sapuangen hanya seperti pelengkap saja. Sudah saatnya Team ini bangkit, kembali meneriakkan yel-yel kemenangan di atas podium, seperti yang sering kita lakukan di event IEMC dan SEM Asia. Sudah saatnya Team lain angkat topi, sebagai bentuk penghormatan atas hasil dari kerja keras dan pengorbanan yang selalui diakhiri dengan doa. Semoga persembahan terakhir dari Penulis yang sederhana ini memberikan sedikit pengetahuan dalam pengembangan mobil. Semoga mimpi Penulis untuk mengangkat *trophy* di ajang ini dapat terwujud di kemudian hari. Aamiin.

Kalimat pertama paragraf ini penulis dedikasikan kepada kedua orang tua, adik, dan keluarga sebagai bentuk ucapan terima kasih yang *special* untuk yang mereka berikan selama ini, terutama doa yang selalu dipanjatkan dengan ikhlas. Penulis, sebagai bentuk penghormatan tertinggi, juga mengucapkan terima kasih kepada :

1. Vivien Suphandani, ST., M.Eng., PhD atas bimbingannya selama penyusunan Tugas Akhir ini.





2. Dr Wawan Aries Widodo, ST., MT., Prof Ir Sutardi., M.Eng., PhD., dan Nur Ikhwan, ST., M.Eng untuk kritik dan saran selama seminar, sidang, dan revisi.
3. Ir Witantyo, M.Eng., Sc dan Alief Wikarta, ST, MSc.Eng, PhD untuk bimbingan di ITS Team Sapuangan.
4. Rakhmatika Sri Wardhani, SSi untuk segala bentuk dukungan moral dan kesetiannya.
5. Zahrah, Ittang, Elsa, serta teman-teman Bengkel 2006, 2007, 2008, 2009, dan 2010 lain untuk kekeluargaan yang begitu hangat.
6. Ittang, Bobo, Danu, Elsa, Fadli, Daffie, Anas, Zaldy, Yasin, Edo, Tito, Reza, Heri, Khosmin, Said, Eka, TJ, dan Hendra sebagai ITS Team Sapuangan yang solid.
7. Arif, Dita, dan Choliq yang telah memilih persimpangan masing-masing untuk bersatu kembali di kemudian hari.
8. Saiful, Anom, Zainun, Yudhi, Cahyo, Heny, Siwi, serta keluarga *Ganesha Event Organizer* #1. *Once a family, we are family!*
9. Seluruh civitas akademika Teknik Mesin FTI ITS termasuk warga laboratorium mekanika dan Mesin Fluida.

Sekali lagi Penulis ucapkan terima kasih sebagai bentuk penghargaan setinggi-tingginya untuk segala bentuk bantuan dan kerja sama selama ini.

Sebagai penutup, Penulis berharap setetes ilmu Allah dalam bentuk laporan ini dapat berguna bagi pembaca dan penerus penelitian ini. *Assalamu'alaikum*

Surabaya, Januari 2015

Penulis



## DAFTAR ISI

Halaman Judul .....	i
Lembar Pengesahan .....	iii
Abstrak .....	v
<i>Abstract</i> .....	vii
Kata Pengantar .....	ix
Daftar Isi .....	xi
Daftar Gambar .....	xiii
Daftar Tabel .....	xvii
 <b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	 1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	3
1.3 Batasan Masalah .....	4
1.4 Tujuan Penelitian .....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	5
 <b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	 7
2.1 Aliran Eksternal .....	7
2.1.1 Konsep lapis batas ( <i>Boundary Layer</i> ) .....	7
2.2.2 Karakteristik <i>Boundary Layer</i> .....	9
2.1.3 Separasi pada <i>Boundary Layer</i> .....	10
2.1.4 Persamaan tekanan .....	11
2.1.5 Gaya aerodinamika .....	14
2.1.6 Teori terjadinya gaya <i>Drag</i> dan gaya <i>Lift</i> .....	16
2.1.7 <i>Airfoil</i> .....	18
2.2 Penelitian yang Relevan .....	21
2.2.1 Dialul Vikri .....	21
2.2.2 Wordley dan Saunders .....	23
2.2.3 Mortel F .....	28
2.3 <i>Numerical Modelling</i> .....	33
2.3.1 <i>Computational Fluid Dynamic</i> (CFD) .....	33
2.3.2 Deskripsi tentang <i>Rans Turbulensi Model</i> .....	35



<b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>	<b>37</b>
3.1 <i>Preprocessing</i> .....	37
3.1.1 Geometri benda uji .....	37
3.1.2 Domain pemodelan .....	46
3.1.3 <i>Meshing</i> .....	48
3.1.4 Parameter pemodelan .....	50
3.2 <i>Processing</i> atau <i>Solving</i> .....	52
3.3 <i>Postprocessing</i> .....	52
3.4 Tahapan penganalisaan .....	53
3.5 <i>Flowchart</i> metode penelitian .....	53
 <b>BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN .....</b>	 <b>55</b>
4.1 <i>Grid Independency</i> .....	55
4.2 Analisa Karakteristik Aliran Melalui Roda Tunggal yang Berotasi .....	57
4.3 Analisa Karakteristik Aliran Melalui <i>Spoiler</i> Tunggal dengan <i>Ground Effect</i> .....	59
4.4 Analisa Karakteristik Aliran Melalui <i>Spoiler</i> dengan Roda yang Berotasi di Belakangnya .....	63
4.4.1 Analisa medan aliran melalui <i>spoiler</i> .....	63
4.4.2 Analisa medan aliran di sekitar <i>endplate</i> .....	71
4.4.3 Analisa gaya <i>lift</i> pada <i>spoiler</i> .....	73
4.4.4 Analisa gaya <i>drag</i> pada <i>spoiler</i> .....	76
4.4.5 Analisa medan aliran melalui roda .....	77
<b>BAB V KESIMPULAN .....</b>	<b>83</b>
5.1 Kesimpulan .....	83
5.2 Saran .....	84
Daftar Pustaka .....	85
Biografi Penulis .....	



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Struktur lapis batas .....	8
Gambar 2.2	Lapis batas didekat permukaan kendaraan Katz .....	9
Gambar 2.3	Aliran dengan <i>pressure gradient</i> .....	11
Gambar 2.4	Terminologi untuk mendeskripsikan aplikasi perumusan Bernoulli .....	12
Gambar 2.5	Distribusi $C_p$ sepanjang 2D kontur <i>automobile</i> Katz .....	14
Gambar 2.6	Gaya <i>lift</i> , <i>drag</i> , <i>side</i> dan momen .....	16
Gambar 2.7	Penguraian komponen gaya <i>drag</i> dan <i>lift</i> .....	16
Gambar 2.8	Aliran fluida melalui <i>airfoil</i> .....	18
Gambar 2.9	Geometri <i>airfoil</i> (a) panjang <i>span</i> , (b) <i>angle of attack</i> , (c) <i>leading edge</i> , <i>trailing</i> <i>edge</i> , <i>maximum</i> , <i>thickness</i> , dan <i>chord</i> .....	19
Gambar 2.10	Pengaruh koefisien lift terhadap <i>angle of</i> <i>attack</i> .....	20
Gambar 2.11	<i>Pressure distribution</i> pada <i>area midspan</i> <i>body</i> Sapuagin <i>Speed</i> 1 .....	21
Gambar 2.12	Grafik <i>Pressure distribution</i> pada <i>area</i> <i>midspan body</i> Sapuagin <i>Speed</i> 1 .....	22
Gambar 2.13	Gambar <i>pathlines</i> , distribusi tekanan, dan distribusi tekanan mobil sapuagin .....	23
Gambar 2.14	(a) hasil <i>meshing</i> profil <i>wing</i> dalam penelitian Zhang dan Zerihan; (b) grafik perbandingan $C_l$ dan $C_d$ antara simulasi CFD dengan <i>wind tunnel</i> .....	24
Gambar 2.15	hasil <i>meshing</i> profil tiga elemen <i>wing</i> depan dengan <i>gurney flap</i> 4% .....	25
Gambar 2.16	(a) grafik hasil simulasi CFD antara <i>Angle</i> <i>of attack</i> vs koefisien gaya angkat dan gaya <i>drag</i> pada <i>front wing</i> ; (b) grafik grafik hasil simulasi CFD antara <i>ground</i>	



	<i>clearance</i> vs koefisien gaya angkat dan gaya drag pada beberapa <i>angle of attack</i> pada <i>front wing</i> ; (c) grafik hasil simulasi CFD antara <i>angle of attack</i> vs koefisien gaya drag dan gaya angkat; (d) simulasi mobil FSAE Monash University .....	26
Gambar 2.17	(a) grafik hasil percobaan <i>front wing</i> pada <i>wind tunnel</i> ; (b) grafik percobaan rear wing pada <i>wind tunnel</i> ; (c) grafik pengaruh ketinggian <i>rear wing</i> dengan gaya angkat; (d) hasil penelitian akhir .....	27
Gambar 2.18	Gambar model dasar dengan <i>airfoil</i> GAW-1 dan <i>end plate</i> NACA 68005 .....	29
Gambar 2.19	Gambar penambahan <i>incline flat plate</i> pada pengembangan pertama .....	30
Gambar 2.20	Gambar pengembangan kedua dengan penambahan <i>lower flat plate</i> .....	31
Gambar 2.21	Gambar meshing domain pemodelan simulasi.....	32
Gambar 2.22	Gambar pathlines pada <i>end plate</i> model pengembangan ke dua .....	33
Gambar 2.23	Blok diagram simulasi dengan CFD .....	34
Gambar 3.1	Distribusi kecepatan pada <i>airfoil</i> tipe S1223 .....	38
Gambar 3.2	Domain pengujian <i>airfoil</i> S1223 .....	39
Gambar 3.3	(a) karakteristik $C_l$ terhadap <i>angle of attack</i> ; (b) perbandingan $C_{l_{max}}$ beberapa tipe <i>airfoil</i> <i>high lift-low Reynolds number</i> .....	40
Gambar 3.4	Gaya-gaya yang bekerja pada mobil sapuan <i>speed 1</i> .....	41
Gambar 3.5	(a) isometri tiga dimensi, (b) isometri tampak samping, (c) isometri tampak depan <i>wing</i> depan mobil formula SAE .....	45



Gambar 3.6	Gambar domain pemodelan simulasi (a) spoiler dengan roda, (b) roda saja, (c) spoiler saja .....	47
Gambar 3.7	(a) meshing <i>spoiler</i> dengan roda, (b) meshing roda tanpa <i>spoiler</i> , (c) meshing <i>spoiler</i> tanpa roda .....	49
Gambar 3.8	Flowchart metodologi penelitian .....	54
Gambar 4.1	Grafik <i>plotting</i> $C_I$ dan <i>relative error</i> untuk <i>Grid Independency</i> .....	56
Gambar 4.2	Grafik $C_p$ pada <i>midspan</i> roda tunggal pada <i>Reynolds number</i> $3.69 \times 10^5$ .....	57
Gambar 4.3	Visualisasi <i>pathlines</i> pada roda .....	58
Gambar 4.4	(a) <i>airfoil</i> S1223 dengan <i>angle of attack</i> $0^\circ$ , (b) pembagian daerah <i>upper</i> dan <i>lower</i> <i>airfoil</i> S1223 dengan <i>angle of attack</i> $18^\circ$ .....	60
Gambar 4.5	Grafik distribusi $C_p$ pada <i>spoiler</i> dengan <i>Reynolds number</i> $3.69 \times 10^5$ .....	61
Gambar 4.6	Visualisasi <i>pathlines</i> pada <i>spoiler</i> .....	62
Gambar 4.7	Grafik distribusi $C_p$ pada <i>upper</i> untuk $Re = 3.69 \times 10^5$ , $Re = 7.39 \times 10^5$ , dan $Re = 1.23 \times 10^6$ .....	64
Gambar 4.8	(a) <i>stagnation point</i> pada <i>leading edge spoiler</i> , (b) kontur tekanan pada <i>upper spoiler</i> .....	64
Gambar 4.9	(a) kontur kecepatan pada potongan <i>spoiler</i> $z/s = 0.81$ , (b) kontur tekanan pada potongan <i>spoiler</i> $z/s = 0.81$ .....	67
Gambar 4.10	Grafik distribusi $C_p$ pada <i>lower</i> untuk $Re = 3.69 \times 10^5$ , $Re = 7.39 \times 10^5$ , dan $Re = 1.23 \times 10^6$ .....	68
Gambar 4.11	Kontur kecepatan pada potongan $x/c = 0.2$ ....	69
Gambar 4.12	Kontur tekanan pada <i>lower spoiler</i> .....	70
Gambar 4.13	Vektor kecepatan di sekitar <i>endplate</i> .....	71



Gambar 4.14	Grafik distribusi $C_p$ pada <i>upperside</i> dan <i>lowerside</i> pada $Z/S = 0.81$ .....	74
Gambar 4.15	Grafik gaya <i>lift</i> dan $C_l$ vs $Re$ .....	75
Gambar 4.16	Grafik gaya <i>drag</i> dan $C_d$ vs $Re$ .....	77
Gambar 4.17	Visualisasi <i>pathline</i> aliran resirkulasi di depan roda .....	78
Gambar 4.18	Grafik perbandingan distribusi $C_p$ pada midspan roda pada $Re \ 3.69 \times 10^5$ .....	79
Gambar 4.19	Visualisasi kontur tekanan pada roda berputar pada $Re = 7.39 \times 10^5$ .....	81



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Tabel hasil simulasi tiga model <i>front wing</i> .....	32
Tabel 3.1	Tabel parameter pada <i>spec sheet</i> data Mobil Sapuangan <i>Speed</i> .....	42
Tabel 3.2	Tabel geometri <i>spoiler</i> depan mobil formula SAE .....	44
Tabel 4.1	Tabel hasil simulasi beberapa <i>mesh</i> untuk <i>grid</i> independensi .....	55
Tabel 4.2	Tabel perbandingan <i>Cl</i> terhadap <i>Re</i> .....	74
Tabel 4.3	Tabel perbandingan gaya <i>drag</i> dan <i>Cd</i> roda tanpa <i>spoiler</i> dan <i>spoiler</i> dengan roda .....	76





*(halaman ini sengaja dikosongkan)*



## **BAB 1**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

*Formula student* adalah sebuah kompetisi membuat kendaraan di bawah naungan *society of Automotive Engineer (SAE)* internasional yang diikuti oleh mahasiswa seluruh dunia. Perlombaan ini diadakan di beberapa Negara antara lain Jepang, Jerman, Inggris, Italia, Brazil, Amerika, dan Australia. Ada dua kategori *event* yang harus diikuti peserta yaitu *static event* meliputi *design report*, *cost report*, dan *business logic* serta *dynamic event* meliputi *acceleration*, *skid pad*, *autocross*, *endurance*, dan *fuel efficiency*. Desain dan bentuk dari mobil dalam kompetisi ini menyerupai mobil formula. Maka dari itu, perlombaan ini dijadikan ajang pembelajaran dan penelitian teknologi mobil formula untuk tingkat mahasiswa.

Tiap peserta harus benar-benar matang dalam mendesain mobil karena tiap *dynamic event* memiliki karakteristik lintasan yang berbeda. Dalam *acceleration event*, mobil diuji dengan melaju secepat mungkin lintasan lurus sepanjang tujuh puluh lima meter. Berbeda dengan *acceleration event*, keempat *dynamic event* lainnya memiliki karakteristik lintasan *stop and go*. Lintasan *event skid pad* berupa dua lingkaran berdiameter sepuluh meter untuk dilalui mobil seperti angka delapan. Sedangkan lintasan tiga *event* lainnya merupakan perpaduan antara lintasan lurus, *slalom*, dan setengah lingkaran beradius tertentu.

Melihat banyak sekali lintasan beradius dalam *event skid pad*, *autocross* dan *endurance*, maka kemampuan mobil dalam *cornering speed* sangat menentukan waktu yang diperoleh. Seperti kita ketahui, mobil formula *single body* memiliki batasan *cornering speed* akibat *rolling* di lintasan beradius. Untuk itu diperlukan tambahan gaya tekan ke bawah untuk meningkatkan kemampuan *cornering speed*. Salah satu solusi untuk menambah gaya tekan ke bawah adalah menambahkan beberapa peralatan tambahan yang menggunakan prinsip aerodinamika. *Spoiler*



depan dan belakang sering dijadikan pilihan peralatan tambahan dalam kasus ini. Berapa penelitian tentang aliran secara 2D dan 3D melewati *spoiler* depan telah banyak dilakukan sejak dulu.

Penelitian tentang penambahan *multi element spoiler* pada mobil formula SAE telah dilakukan oleh beberapa universitas, salah satunya adalah Monash University, oleh **Wordley and Saunders** [1] tentang prediksi performa mobil dengan penambahan *spoiler*. Dalam penelitiannya tersebut dijelaskan mobil dengan *spoiler* akan lebih cepat 2 km/jam di tikungan tetapi lebih lambat 0,19 detik di trek lurus sepanjang 75 meter. Bentuk *airfoil* dan *angle of attack* yang bekerja pada *spoiler* sangat berpengaruh terhadap gaya angkat negatif dan gaya *drag* yang dihasilkan. Dalam penelitian tersebut digunakan analisa numerik 2D menggunakan CFD yang terkonsentrasi pada *centerline airfoil*.

Struktur aliran ketika melewati geometri bodi yang kompleks dirasa kurang cukup bila karakteristiknya dideskripsikan hanya menggunakan analisa 2D. Pada *spoiler*, analisa aliran 3D dirasa perlu digunakan saat aliran tersebut menerima banyak gangguan. Gangguan tersebut biasa terjadi dengan adanya aliran yang mengalir dari daerah bertekanan tinggi (*pressure side*) menuju daerah bertekanan rendah (*suction side*) melewati ujung samping *airfoil*. Interaksi antara *pressure side* dan *suction side* tersebut membuat terjadinya *wing tip vortex* yang akan memunculkan *downwash*. Dengan adanya *downwash* akan menambah *induced drag* dan memperkecil *lift* yang terjadi. Untuk itulah, kajian mengenai analisa aliran secara 3D ini sangat penting pada sebuah kendaraan.

Analisa aliran 3D pada aerodinamika *front wing* mobil formula 1 dengan menggunakan teknik CFD oleh **Mortel** [2]. Penelitian *front wing* ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan *end late* dan *incline flat plate* di bagian *end plate* terhadap *downforce* yang dihasilkan. *Endplate* digunakan untuk mengarahkan aliran fluida agar tidak bertumbukan dengan roda sehingga mengurangi gaya *drag* dan menambah *downforce*.



Sedangkan *incline flat plate* ditambahkan dengan tujuan menghasilkan *vortex lift* akibat separasi aliran dan menghasilkan *downforce* tambahan akibat induksi aliran dari roda. Penambahan *incline flat plate* meningkatkan koefisien *lift* sebesar 11%.

## 1.2 Perumusan Masalah

Mobil formula bodi tunggal memiliki batasan kecepatan ketika melewati lintasan beradius. Ketika mobil melewati batas kecepatan, maka mobil akan *rolling* dan menyebabkan diskualifikasi dari panitia. Bentuk dasar mobil formula jika dilihat dari samping adalah cembung ke atas di bagian atas dan datar di bagian bawah. Ini berarti lintasan aliran fluida di atas *body* lebih panjang dari bagian bawah, sehingga terjadi perbedaan kecepatan aliran dan tekanan yang mengakibatkan gaya *lift*. Hal ini semakin membatasi kemampuan *cornering speed* mobil.

Berbeda dengan *body* mobil, *downforce* pada *spoiler* dapat terjadi karena laju aliran di bagian atas *airfoil* (*pressure side*) lebih rendah dibandingkan dengan laju aliran di bawah *airfoil* (*suction side*), sehingga tekanan di bagian atas *airfoil* lebih tinggi daripada tekanan di bawah *airfoil* yang menyebabkan terjadinya gaya tekan ke bawah (*downforce*) sehingga dapat meningkatkan kemampuan *cornering speed* mobil.

Karakteristik aliran yang melewati sebuah *airfoil* yang diinteraksikan dengan roda berputar di belakangnya mempengaruhi banyak hal. Roda yang berputar menghasilkan induksi aliran yang sering disebut *downwash* yang mengakibatkan mendekatnya titik stagnasi ke tanah dan menambah *downforce* pada *airfoil* di depannya. Sedangkan dengan adanya *airfoil* di depan roda berputar dapat mereduksi *drag* yang dihasilkan roda dengan menunda separasi di bagian belakang roda.

Berdasarkan beberapa pemahaman mengenai fenomena aliran di atas, tugas akhir ini mencoba untuk menganalisa bagaimana fenomena aliran melewati *spoiler* depan yang diinteraksikan dengan roda berputar di belakangnya.



### 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan pada penelitian dengan menggunakan perangkat lunak *CFD* ini adalah :

1. Aliran pada *inlet* dianggap *uniform*, *incompressible flow*, dan *steady flow*.
2. *Ground* merupakan *moving wall* dengan kecepatan sama dengan kecepatan *inlet*.
3. *Reynolds number*  $3.69 \times 10^5$ ,  $7.39 \times 10^5$ , dan  $1.23 \times 10^6$ .
4. Roda berputar dengan kecepatan sebesar kecepatan *inlet* dibagi radius roda.
5. Perpindahan panas diabaikan.
6. Desain *spoiler* depan mengacu pada penelitian *spoiler* belakang oleh Arif [3].
7. Geometri *airfoil* pada *spoiler* :
  1. *Chord* : 647 mm
  2. *Span* : 840 mm
  3. *Aspect Ratio (AR)* : 1.21
  4. *Angle of Attack* :  $18^0$
  5. *Diameter roda* : 510 mm
  6. *Ground clearance* : 40 mm.
  7. *Jarak spoiler terhadap roda* : 20 mm

### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan diadakannya penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik aliran 3D beserta efek gaya aerodinamika yang ditimbulkan pada saat melewati *spoiler* depan mobil FSAE yang dengan variasi kecepatan *inlet*. Melalui pemodelan numerik *Computational Fluid Dynamics* (CFD) akan dikaji beberapa parameter, antara lain :

1. Nilai distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ), koefisien *drag* ( $C_D$ ), dan koefisien *lift* ( $C_L$ ) pada *spoiler* dan roda depan mobil Formula SAE.
2. Visualisasi aliran meliputi tampilan *pathlines*, kontur kecepatan dan tekanan statis, serta tampilan distribusi



vektor kecepatan saat melewati *spoiler* dan roda depan mobil Formula SAE.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Dengan dilakukannya penelitian ini diharapkan membawa manfaat yaitu :

1. Mengetahui nilai distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ), koefisien *drag* ( $C_D$ ), dan koefisien *lift* ( $C_L$ ) pada *spoiler* depan mobil Formula SAE.
2. Mengetahui fenomena aliran secara fisis disekitar *spoiler* melalui visualisasi *pathlines* dengan perangkat lunak CFD akibat pengaruh kecepatan *inlet* dan interaksi dengan roda berputar di belakangnya.
3. Memberikan kontribusi nyata pada ITS Team Sapuagin Speed yang nantinya bisa digunakan sebagai rujukan pengembangan mobil Sapuagin Speed.



*(halaman ini sengaja dikosongkan)*



## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Aliran Eksternal**

##### **2.1.1 Konsep lapis batas (*Boundary Layer*)**

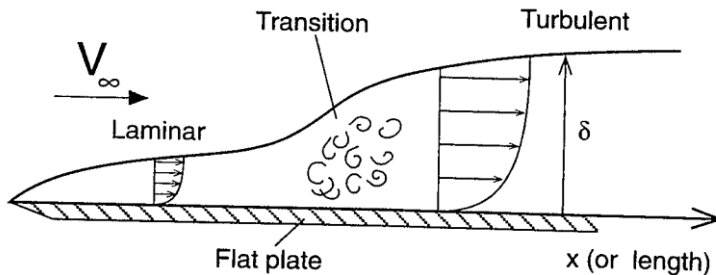
*Boundary layer* (lapis batas) merupakan lapisan tipis pada *solid surface* yang terbatas daerah sangat sempit dekat permukaan kontur dengan kecepatan fluida tidak *uniform* dikarenakan tegangan geser yang muncul akibat viskositas.

Dari penjelasan di atas, aliran melintasi suatu kontur diklasifikasikan menjadi dua daerah yaitu :

1. Daerah di dalam lapis batas (dekat permukaan kontur) dengan efek viskositas yang sangat berpengaruh (*viscous flow*).
2. Daerah di luar lapis batas dengan efek viskositas diabaikan (*nonviscous flow*).

Gambar 2.1 memperlihatkan suatu fluida mengalir dengan distribusi kecepatan yang sama atau *uniform* ( $U_{\infty}$ ). Ketika melewati suatu *solid surface*, aliran tersebut mengalami distribusi kecepatan yang berbeda sebagai pengaruh adanya tegangan geser pada permukaan padat. Distribusi kecepatan ini dimulai dari titik di permukaan padat tersebut, dimana aliran fluida mempunyai kecepatan nol. Kemudian menjadi semakin besar ketika menjauhi permukaan bodi. Pengaruh tegangan geser akan hilang pada posisi tertentu dan kecepatan fluida mencapai harga kecepatan fluida *non viscous* ( $u = 0,99 U_{\infty}$ ). Posisi tersebut merupakan batas daerah *viscous* dengan bagian *non viscous*. Jarak yang terukur dari permukaan padat arah normal hingga posisi tersebut disebut tebal lapis batas (*boundary layer thickness*,  $\delta$ ). Dimana tebal lapis batasnya akan meningkat seiring dengan bertambahnya jarak atau lintasan.

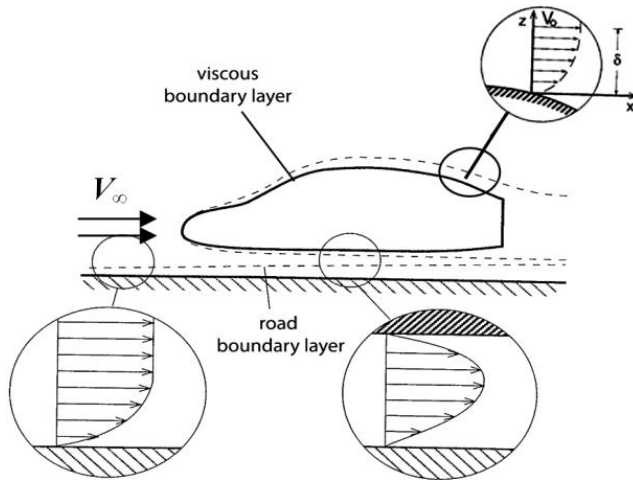




Gambar 2.1 Struktur lapis batas[4]

Lapis batas pada permukaan padat akan berkembang dari ujung plat (*leading edge*). Tebal lapis batas pada daerah *leading edge* masih tipis, dimana partikel-partikel bergerak secara berlapis-lapis dan lapis batas yang terjadi disebut lapis batas laminar. Semakin jauh fluida bergerak dari ujung plat, lapis batas akan semakin berkembang dan aliran akan berubah mendekati turbulen.

Adanya lapis batas menyebabkan kerugian *momentum flux* dibanding aliran *inviscid*. Ketebalan dalam aliran *inviscid* yang mempunyai *momentum flux* sama dengan defisit *momentum flux* dalam lapis batas disebut *momentum thickness* ( $\theta$ ). Kerugian momentum ini dapat digunakan untuk mengetahui seberapa besar koefisien friksi permukaan ( $C_f$ ).



Gambar 2.2 Lapis batas didekat permukaan kendaraan Katz [5]

Ketebalan dari lapis batas sekitar beberapa mm didepan kendaraan yang melaju pada 100 km/jam, dan beberapa cm pada bagian belakangnya. Seperti yang diketahui, semakin tebal lapis batas berkontribusi pada terbentuknya *viscous friction drag* yang semakin besar.

### 2.1.2 Karakteristik *Boundary Layer*

Jenis lapis batas yang terjadi pada aliran udara yang mengalir suatu obyek sangat ditentukan oleh bilangan *Reynolds* ( $R_e$ ). Hal ini dapat dijelaskan bahwa dalam lapis batas gaya *viscous* dan gaya inersia sangat penting, sementara bilangan *reynolds* sendiri menggambarkan perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya *viscous*.

$$R_e = \frac{\text{Gaya Inersia}}{\text{Gaya Viscous}} \quad (2.1)$$

$$\text{dimana : Gaya Inersia} = p \times A = \rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot L^2 \quad (2.2)$$



$$\text{Gaya Viscous} = \tau \times A = \left( \frac{\mu U_{\infty}}{L} \right) L^2 \quad (2.3)$$

Sehingga,

$$R_e = \frac{\rho U_{\infty}^2 L^2}{\left( \frac{\mu U_{\infty}}{L} \right) L^2} = \frac{\rho U_{\infty} L}{\mu} \quad (2.4)$$

dimana :  $\rho$  : Densitas fluida

$U_{\infty}$  : Kecepatan aliran *free stream* fluida

L : Panjang karakteristik yang diukur pada medan aliran, dalam kasus ini adalah panjang kendaraan

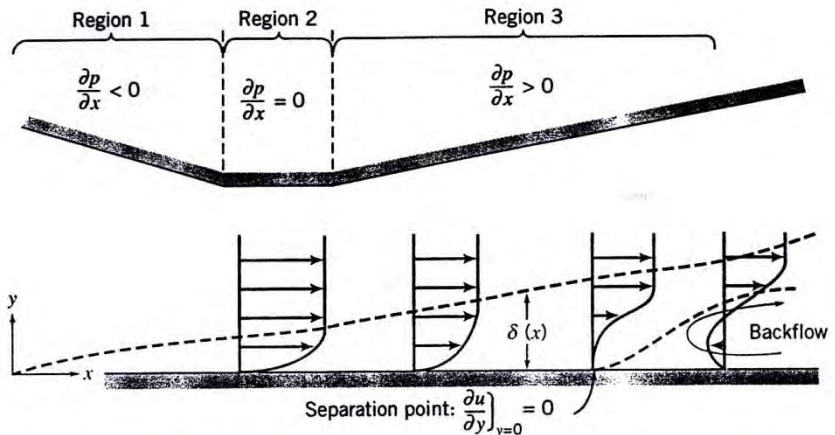
$\mu$  : Viskositas dinamis fluida.

Sehingga,

$$R_e = \frac{\rho U_{\infty} L}{\mu} \quad (2.5)$$

### 2.1.3 Separasi pada *Boundary Layer*

Di dalam *boundary layer* ditemukan suatu fenomena yang disebut sebagai separasi. Separasi ini menimbulkan aliran yang terbalik arahnya dari aliran utama. Separasi merupakan peristiwa dimana aliran fluida terpisah dari permukaan benda. Proses separasi diawali dengan adanya aliran fluida yang terus menerus mengalami perubahan karena adanya gaya gesek. Akibat gaya gesek tersebut, momentum alirannya berkurang sampai suatu saat momentum alirannya sudah tidak bisa mengatasi hambatan sehingga aliran akan terpisah dari permukaan benda. Pada titik dimana separasi terjadi, *gradient* tekanan pada permukaan bodi adalah nol dan aliran fluida di belakang titik separasi arahnya berlawanan dengan arah aliran utama.



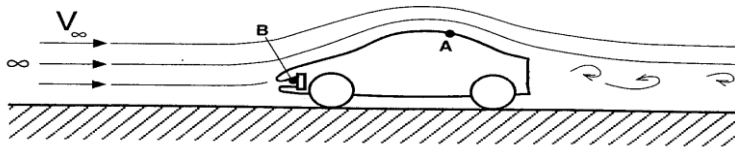
Gambar 2.3 Aliran dengan pressure gradient [4]

Separasi sangat dipengaruhi oleh *gradient* tekanan sepanjang aliran, khususnya oleh *adverse pressure gradient*, yaitu tekanan yang semakin meningkat sejajar dengan arah aliran

sepanjang permukaan benda kerja  $\left[\frac{dP}{dx}\right] > 0$ . Pada daerah *adverse pressure gradient*, aliran fluida akan mengalami hambatan selain karena adanya gesekan juga karena adanya kenaikan tekanan tekanan pada arah aliran fluida. Pada saat momentum fluida sudah tidak dapat melawan hambatan ini, aliran fluida tidak akan bisa bergerak lebih jauh sepanjang permukaan benda hingga aliran akan mengalami separasi.

#### 2.1.4 Persamaan tekanan

Udara yang bergerak dari daerah yang bertekanan tinggi ke daerah bertekanan rendah atau *favourable pressure gradient* akan dipercepat alirannya oleh karena perbedaan tekanan tersebut, dan sebaliknya akan diperlambat jika dari tekanan rendah ke tekanan tinggi atau *adverse pressure gradient*.



*Gambar 2.4 Terminologi untuk mendeskripsikan aplikasi perumusan Bernoulli[5]*

Sejumlah aliran pada bodi kendaraan yang diilustrasikan pada gambar 2.4 diatur oleh hubungan antara kecepatan dan tekanan yang diekspresikan melalui persamaan Bernoulli sebagai berikut.

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} = \text{Konstan} \quad (2.6)$$

$$P_{\text{statik}} + P_{\text{dinamik}} = \text{konstan} = P_{\text{total}} \quad (2.7)$$

$$P_B - P_{\infty} = \rho/2 V_{\infty}^2 \quad (2.8)$$

Persamaan ini mempunyai arti bahwa aliran udara yang mengalami kenaikan tekanan, akan diimbangi dengan penurunan kecepatan aliran udara tersebut atau sebaliknya. Dengan begitu, kita dapat mengetahui besarnya tekanan pada sepanjang kontur bodi, dalam hal ini diwakilkan oleh titik B. Tetapi perlu diketahui bahwa asumsi yang digunakan untuk persamaan ini adalah perbedaan ketinggian diabaikan, tidak ada perbedaan densitas (aliran incompressibel), aliran *steady*, aliran sepanjang *streamline*, dan aliran tanpa gesekan.

Tekanan statis ( $P_{\text{statik}}$ ) adalah tekanan yang diukur melalui suatu instrumen atau alat yang dimana kecepatan alat ukur tersebut sama dengan kecepatan aliran fluida. Tekanan statis bisa dikatakan pula tekanan udara pada setiap titik, sedangkan tekanan dinamik ( $P_{\text{dinamik}}$ ) menunjukkan energi kinetik tiap satuan volume. Tekanan dinamik inilah yang berpengaruh langsung terhadap



gaya-gaya aerodinamik yang terjadi pada kendaraan tersebut, seperti *drag* dan *lift*.

Tekanan stagnasi (tekanan total) adalah tekanan yang diukur pada suatu titik dimana aliran fluida diperlambat mendekati nol dengan proses tanpa gesekan dan arah tumbukan fluida adalah tegak lurus dengan bidang tumbukan.

Perbedaan antara tekanan lokal statik pada setiap titik dalam aliran dengan tekanan statik pada *free stream* bergantung langsung dengan tekanan dinamik pada *free stream*, dan perbandingan ini yang disebut dengan koefisien tekanan atau *pressure coefficient* ( $C_p$ ). Atau :

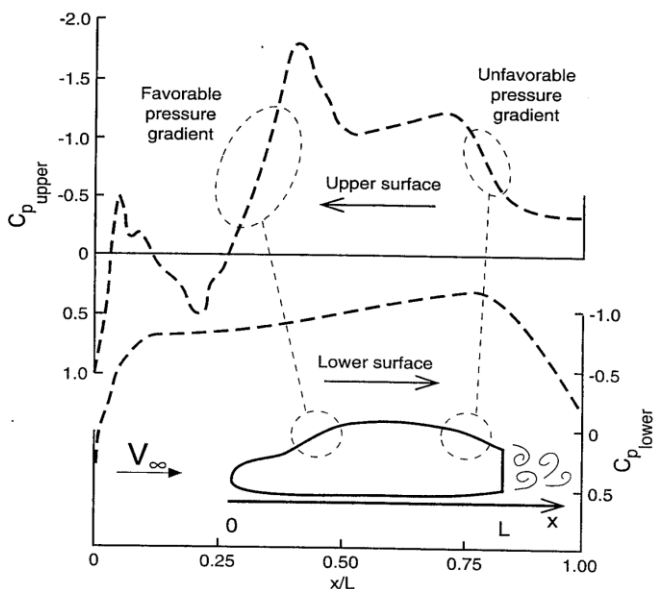
$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} = 1 - \frac{V^2}{V_\infty^2} \quad (2.9)$$

dimana  $P$  : Tekanan statik lokal atau tekanan pada kontur

$p_\infty$  : tekanan statik free stream

$V$  : kecepatan lokal aliran

$V_\infty$  : kecepatan free stream



*Gambar 2.5 Distribusi  $C_p$  sepanjang 2D kontur automobile Katz [5]*

Timbul atau tidaknya gaya angkat dapat dilihat secara langsung dari distribusi tekanan atau  $C_p$  pada permukaan atas dan bawah dari kontur seperti pada gambar 2.5. Jika selisih distribusi tekanan pada permukaan atas dan bawah bernilai positif maka *lift* yang timbul akan menyebabkan profil terangkat, sedangkan bila yang terjadi adalah sebaliknya maka gaya angkat negatif akan menyebabkan profil tertekan kebawah. Selisih distribusi tekanan, besar kecilnya gaya angkat maupun gaya hambat juga ditentukan oleh gaya gesek dalam bentuk skin *friction coefficient* ( $C_f$ ).

### 2.1.5 Gaya aerodinamika

Penelitian aerodinamika yang selama ini telah dilakukan awalnya terpusat pada pengurangan *drag*. Akan tetapi, saat ini gaya-gaya lain seperti gaya angkat dan gaya samping juga menyumbang peranan yang cukup signifikan terhadap stabilitas



kendaraan. Efek samping yang merugikan dari bentuk kendaraan yang rendah *drag* ditemukan selama awal 1980-an yang dapat mengurangi stabilitas terutama ketika mengemudi dalam kondisi angin silang (*cross wind*). Efek angin silang saat ini rutin dipertimbangkan oleh perancang, tetapi pengertian kita tentang tingginya kompleksitas dari seringnya aliran *unsteady* yang bersatu dengan aliran udara disekitar kendaraan kini menjadi sederhana. Teknik eksperimental dan metode prediksi pada *CFD* tetap membutuhkan pengembangan yang kuat jika sebuah pengetahuan yang cukup dari aliran fisik akan dicapai.

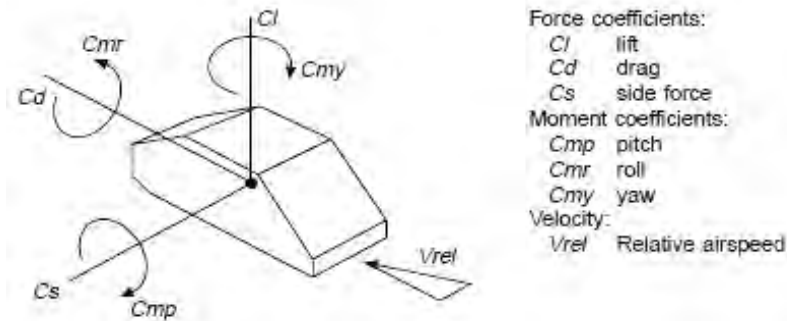
Gaya dan momen aerodinamika yang terdapat pada kendaraan diilustrasikan melalui gambar 2.6. Koefisien gaya ( $F$ ) dan momen ( $M$ ) didefinisikan melalui persamaan dibawah ini.

$$C_F = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} \quad (2.10)$$

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho v^2 A l} \quad (2.11)$$

Dimana  $F$  adalah gaya (*lift*, *drag* atau *side*),  $M$  adalah momen,  $\rho$  adalah *densitas* udara,  $v$  adalah kecepatan,  $A$  adalah luasan referensi dan  $l$  adalah panjang referensi. Saat gaya aerodinamika bekerja pada kendaraan ketika diberikan kecepatan tertentu yang proporsional baik dari koefisien yang tepat dan dari luasan depan, produk dari  $C_{FA}$  biasanya digunakan untuk mengukur performansi aerodinamika khususnya *drag*.

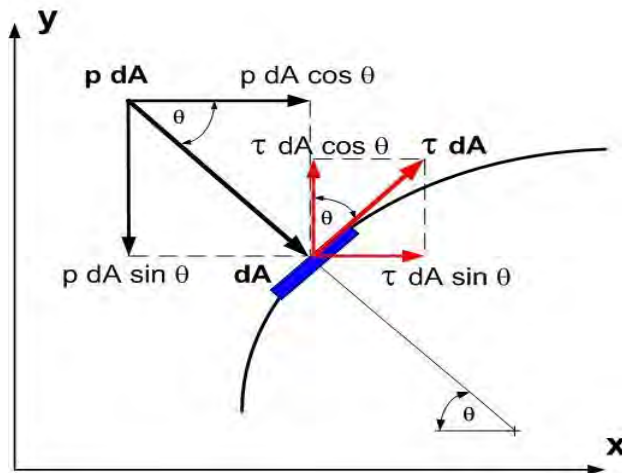




Gambar 2.6 Gaya lift, drag, side dan momen[5]

### 2.1.6 Teori terjadinya gaya drag dan gaya lift

Sebuah benda yang dialiri sebuah aliran *viscous* atau *incompressible* akan menghasilkan gaya-gaya aerodinamika. Gaya-gaya tersebut dihasilkan karena adanya tekanan dan gaya geser pada permukaan benda. Gaya yang sejajar horisontal dengan aliran disebut dengan gaya *drag*. Sedangkan gaya yang tegak lurus dengan aliran disebut gaya lift.



Gambar 2.7 Penguraian komponen gaya drag dan lift[6]



Penguraian gaya *drag* dapat dilihat pada gambar 2.7. Gaya *drag* yang terjadi dapat berupa *skin friction drag* ( $F_{Df}$ ) yaitu gaya hambat yang menyinggung permukaan secara tangensial yang timbul sebagai akibat adanya *viskositas* (tegangan geser antara fluida dan permukaan benda) dan *pressure drag* ( $F_{Dp}$ ) yaitu gaya hambat yang tegak lurus terhadap permukaan benda yang timbul karena adanya tekanan fluida. Resultan antara *friction drag* dan *pressure drag* ini disebut sebagai total *drag*. Gaya hambat yang terbentuk dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$F_D = F_{Dp} + F_{Df} \quad (2.12)$$

$$F_D = \int \cos \theta (p \, dA) + \int \sin \theta (\tau \, dA) \quad (2.13)$$

Untuk merancang suatu kendaraan salah satu faktor aerodinamis yang paling penting adalah *drag force*. Gaya total yang menahan laju bergeraknya suatu kendaran adalah berasal dari tahanan roda dengan jalan atau *mechanical grip* dan *aerodynamic drag*. Besarnya *drag* ini untuk setiap bentuk kendaraan berbeda satu dengan yang lainnya, dan ini tergantung pada faktor koefisien *drag* atau  $C_D$ . Biasanya gaya hambat sering diekspresikan dalam bilangan tak berdimensi yaitu koefisien *drag* ( $C_D$ ) yang didefinisikan sebagai berikut:

$$C_D = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (2.14)$$

Dimana : A = luas frontal

$\rho$  = densitas udara

V = kecepatan kendaraan relatif terhadap udara

Aerodinamik *drag* selain bergantung pada koefisien *drag* dan hubungannya seperti rumusan diatas, juga dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti sifat turbulensi aliran dan bilangan *Reynolds*. Ketergantungan pada bilangan *Reynolds* ini mempunyai arti bahwa koefisien *drag* bervariasi sesuai kecepatan.

Sama halnya dengan gaya *drag*, gaya angkat juga terjadi akibat resultan gaya tekan dan gaya geser ke arah sumbu y pada

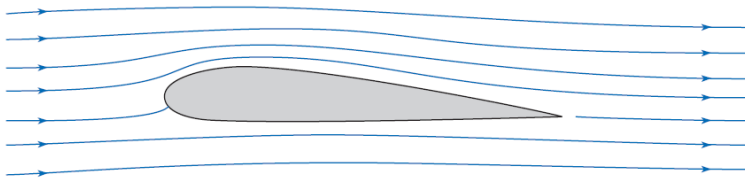


gambar 2.9. Sehingga gaya angkat dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$F_L = F_{Lp} + F_{Lf} \quad (2.15)$$

$$F_L = -\int \sin \theta (p \, dA) + \int \cos \theta (\tau \, dA) \quad (2.16)$$

Gaya *lift* total yang bekerja pada *body* yang dialiri fluida merupakan resultan dari gaya *lift* yang bekerja pada *upper body* dan *lower body*.



*Gambar 2.8 Aliran fluida melalui airfoil[7]*

Gambar 2.8 menunjukkan aliran fluida yang melewati sebuah *airfoil*. Dapat dilihat kecepatan fluida di atas *upper body* lebih cepat dari pada *lower body* yang ditunjukkan oleh rapatnya jarak antar *streamline* di atas *upper body*. Aliran yang lebih cepat di atas *upper body* menimbulkan area bertekanan rendah di atas *upper body* dibandingkan di bawah *lower body*. Resultan gaya tekan yang bekerja pada *body* atas dan bawah adalah total *lift*.

Tiap *body* memiliki karakteristik gaya *lift* yang berbeda. Karakteristik gaya *lift* ditunjukkan dengan *coefficient of lift* ( $C_L$ ). Besarnya koefisien *lift* dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (2.17)$$

dimana : A = luas *plan area*

$\rho$  = densitas udara

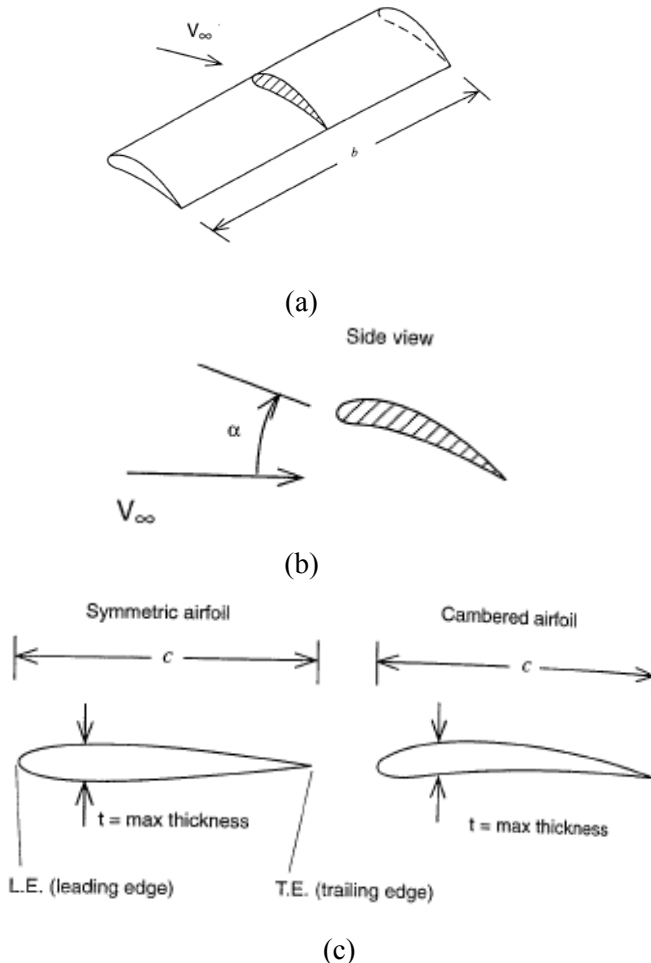
V = kecepatan kendaraan relatif terhadap udara

### **2.1.7 Airfoil**

*Airfoil* merupakan peralatan yang memanfaatkan prinsip kerja aerodinamika untuk menghasilkan gaya *lift* atau *downforce*.



sesuai kebutuhan penggunaannya. Bentuk *airfoil* menyerupai tetesan air berbentuk simetri, ada juga yang dimodifikasi dengan pemberian *chamber* seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.9.



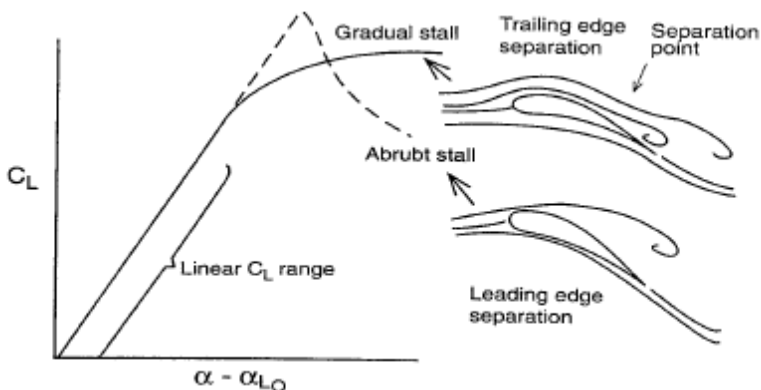
Gambar 2.9 Geometri airfoil (a) panjang span, (b) angle of attack, (c) leading edge, trailing edge, maximum, thickness, dan chord[7]



Beberapa istilah yang sering digunakan berkaitan dengan airfoil adalah *leading edge* yaitu ujung depan dari *airfoil*, *trailing edge* yaitu ujung belakang *airfoil*, *chord* yaitu panjang *airfoil* dari *leading edge* sampai *trailing edge*, *span* yaitu panjang *airfoil* dengan arah *perpendicular* dengan *chord*, dan *angle of attack* yaitu sudut yang dibentuk *airfoil relative* terhadap arah aliran. Selain itu hal yang sering diperhatikan dari bentuk *airfoil* adalah ketebalan maksimum dari *airfoil*.

Prinsip kerja *airfoil* menggunakan prinsip Bernoulli, yaitu memanfaatkan perbedaan kecepatan aliran pada sisi atas dan bawah *airfoil* untuk menghasilkan *lift* atau *downforce*. Sisi *airfoil* yang bertekanan lebih tinggi disebut *pressure side*, sedangkan yang lebih rendah disebut *suction side*.

Factor yang paling berpengaruh dari *lift* atau *downforce* yang dihasilkan *airfoil* adalah *angle of attack*. Semakin besar *angle of attack*, maka *lift* atau *downforce* yang dihasilkan semakin besar. Namun pada sudut tertentu akan terjadi *stall*, yaitu fenomena kehilangan *lift* atau *downforce* diiringi dengan meningkatnya *drag* secara signifikan. Ada dua fenomena yang menyebabkan *stall*, yaitu *leading edge separation* dan *trailing edge separation* seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Pengaruh koefisien lift terhadap *angle of attack*[7]

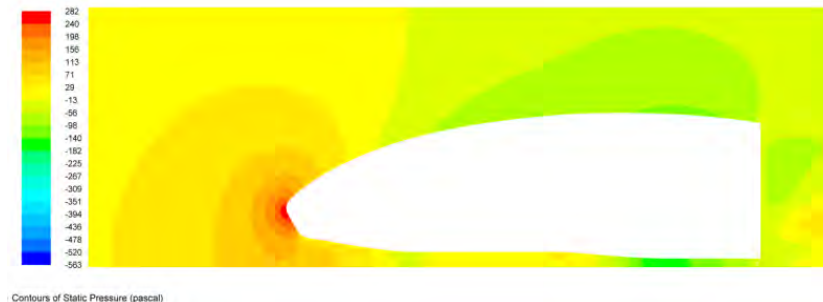


## 2.2 Penelitian yang Relevan

### 2.2.1 Penelitian karakteristik aliran melewati bodi mobil Sapuangin Speed 1 dengan rasio *Ground Clearance* terhadap panjang model (C/L) 0.014 [8]

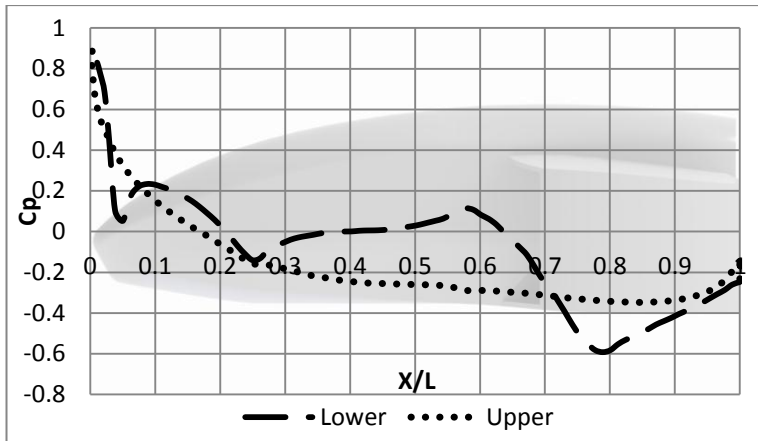
Penelitian tentang aliran fluida di sekitar *body* formula sae tunggal pernah dilakukan oleh Vikri. Penelitian ini menggunakan *body* tunggal Sapuangsinspeed 1 dengan dimensi panjang 2913 mm, lebar 1428 mm, tinggi 686 mm, dan *ground clearance* 40 mm. Kecepatan *inlet* yang dipakai dalam penelitian ini adalah 22.22 m/s dengan  $Re_L = 3.3541 \times 10^6$ . Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui distribusi tekanan ( $C_p$ ), koefisien *drag* ( $C_d$ ), dan koefisien *lift* ( $C_l$ ) akibat pengaruh bentuk *leading edge* dan *side pontoon*.

Salah satu hasil penelitian ini adalah distribusi tekanan pada body daerah midspan yang bisa dilihat pada gambar 2.11.



Contours of Static Pressure (pascal)

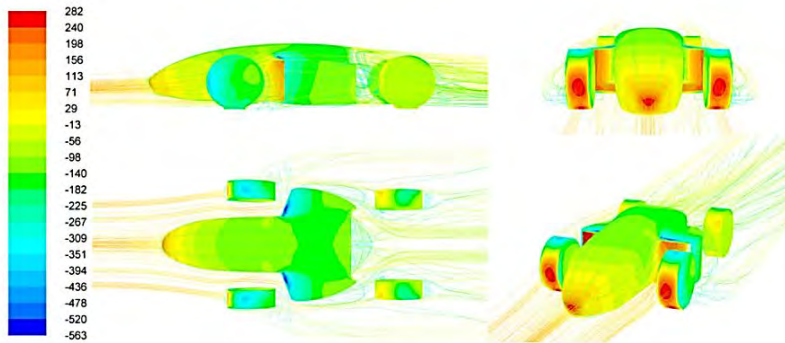
Gambar 2.11 Pressure distribution pada area midspan body  
Sapuangin Speed 1[8]



*Gambar 2.12 Grafik pressure distribution pada area midspan  
body Sapuangan Speed 1[8]*

Dapat dilihat pada gambar 2.11 fluida *free stream* mengalir menuju *body* dan kemudian bertumbukan dengan *leading edge body* sehingga aliran mengalami perlambatan dan menghasilkan momentum yang tinggi. Hal tersebut dapat dilihat dengan merahnya warna di ujung *leading edge*. Kemudian aliran akan terpecah melewati *upperside body* dan *lowerside body* untuk membentuk *boundary layer* dengan *ground*. Dari gambar 2.12 yang berisi distribusi  $C_p$ , dapat dilihat bahwa sebagian besar  $C_p$  *upperside* lebih rendah dibandingkan dengan  $C_p$  *lowerside*.  $C_p$  maksimum terjadi pada jarak  $x/l = 0.08$  dengan nilai  $C_p = 0.233$ .

Dalam simulasi 3D, separasi aliran tidak hanya menuju *upperside* dan *lowerside body*, namun juga sisi samping kanan kiri yang akan bertumbukan dengan *sidepontoon* dan roda. *Pathline* dan kontur kecepatan serta tekanan pada *body* sapuangan speed 1 dapat dilihat di gambar 2.13.



Contours of Static Pressure (pascal)

Gambar 2.13 Gambar pathlines, distribusi tekanan, dan distribusi tekanan mobil sapuangin[8]

Melalui gambar 2.13 tampak terjadi *multi stagnasi* pada *body* ditandai dengan spectrum warna merah pada *leading edge*, roda dan *sidepontoon*.

Perhitungan gaya *drag* pada bodi sapuangin speed didasarkan pada penentuan control volume pada daerah *midspan*. Gaya *drag* dan gaya *lift* didapat dari hasil perhitungan *ansys fluent 14*. Dari pemodelan bodi didapatkan grafik karakteristik distribusi tekanan pada daerah *midspan* seperti pada grafik 2.1.  $C_d$  yang dihasilkan pada penelitian ini adalah 0.659371. Sedangkan  $C_l$  yang dihasilkan dari simulasi ini sebesar 0.259982.

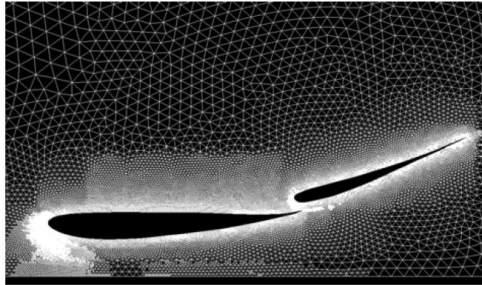
### 2.2.2 Penelitian tentang pengaruh penambahan *wing* dengan membandingkan metode komputasi dan aplikasi pada *wind tunnel* oleh Wordley dan Saunders[1]

Metode numerik pada penelitian ini digunakan terlebih dahulu untuk mengembangkan dan mencari bentuk dan profil *multi-element wing* yang mempunyai gaya angkat negatif yang tinggi yang masih sesuai dengan peraturan perlombaan Formula SAE. Awalnya dilakukan perbandingan dengan penelitian sebelumnya milik **Zhang dan Zerihan** tentang dua elemen *wing* terisolasi terhadap *ground effect* yang diuji menggunakan CFD

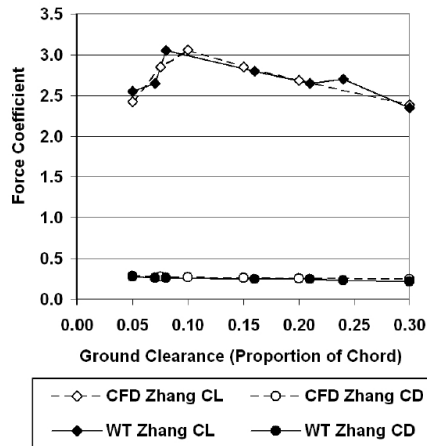




dan *wind tunnel*. Dari penelitian **Zhang dan Zerihan** tersebut diketahui bahwa hasil simulasi CFD hampir sama dengan pengujian pada *wind tunnel* dengan hasil yang ditunjukkan pada gambar 2.14.



(a)

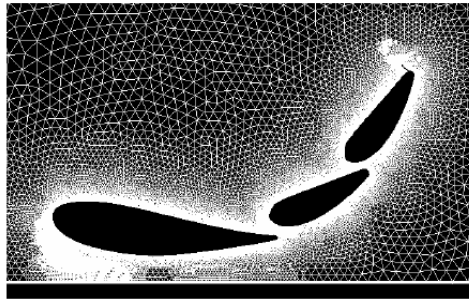


(b)

Gambar 2.14 (a) hasil meshing profil wing dalam penelitian Zhang dan Zerihan; (b) grafik perbandingan  $C_l$  dan  $C_d$  antara simulasi CFD dengan *wind tunnel*[1]

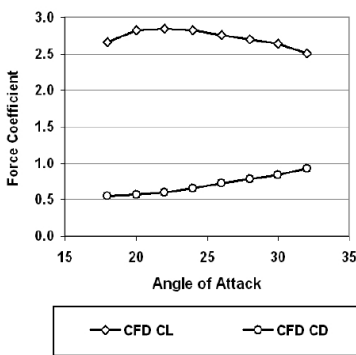


Dari perhitungan dan analisa terhadap *downforce* yang dibutuhkan didapatkan model airfoil pada *wing* sesuai dengan rekomendasi **McBeath**, yaitu tiga elemen *wing* dengan *gurney flap* (3% pada sayap depan dan 4% pada sayap belakang) yang digunakan pada *flap* paling akhir seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.15.

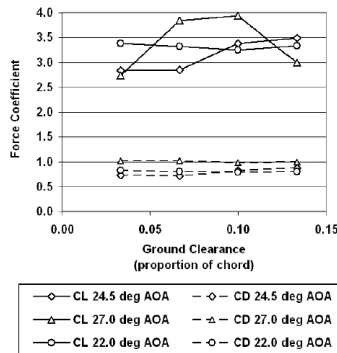


*Gambar 2.15 hasil meshing profil tiga elemen wing depan dengan gurney flap 4%[1]*

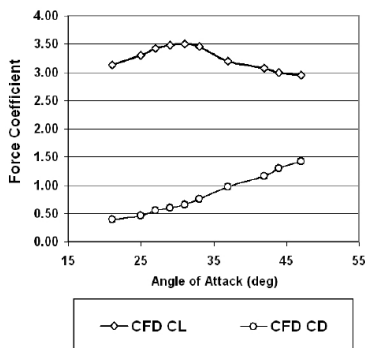
Profil *wing* yang digunakan ini selanjutnya dianalisa dengan CFD 2D. Pada *front wing* menunjukkan saat *angle of attack* 22 derajat, *stall* mulai terjadi yang ditunjukkan dengan gambar 2.16(a). Sedangkan pengaruh *angle of attack* dengan *moving ground* ditunjukkan dengan gambar 2.16(c)



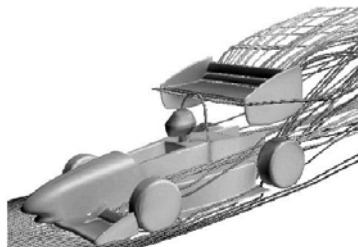
(a)



(b)



(c)



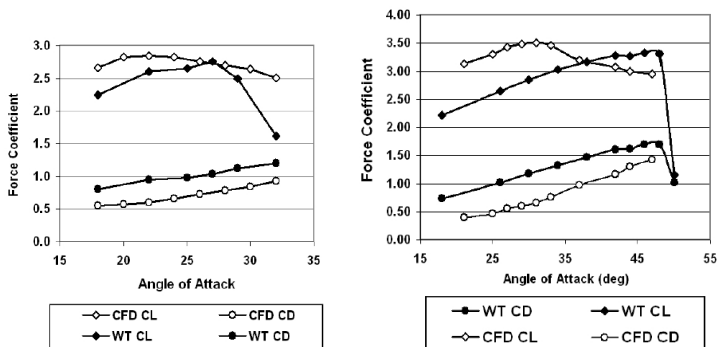
(d)

Gambar 2.16 (a) grafik hasil simulasi CFD antara Angle of attack vs koefisien gaya angkat dan gaya drag pada front wing; (b) grafik grafik hasil simulasi CFD antara ground clearance vs koefisien gaya angkat dan gaya drag pada beberapa angle of attack pada front wing; (c) grafik hasil simulasi CFD antara angle of attack vs koefisien gaya drag dan gaya angkat; (d) simulasi mobil FSAE Monash University[1]



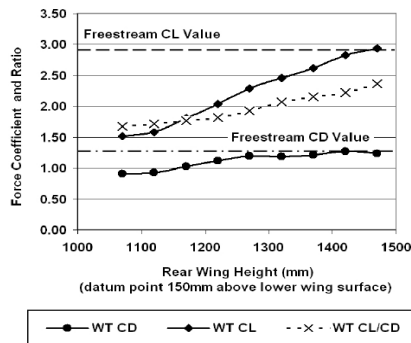
Pada *rear wing* diprediksikan *stall* terjadi pada 31 derajat, sedangkan gaya *drag* terus meningkat terutama setelah *stall* terjadi. Hal ini dikarenakan separasi yang terjadi sudah sangat dominan.

Pada percobaan di *wind tunnel*, menunjukkan sedikit perbedaan, yaitu pada *front wing stall* terjadi pada sudut 24 derajat, sedangkan pada *rear wing stall* terjadi pada 48 derajat ditunjukkan dengan gambar grafik 2.17.



(a)

(b)



(c)



FINAL RESULTS	
The net measured downforce and drag of the 2003 Monash Formula SAE car was:	
• Car Coefficient of Lift:	-2.57
• Car Coefficient of Drag:	1.33
• Car Frontal Area:	1.35 m <sup>2</sup>

(d)

*Gambar 2.17 (a) grafik hasil percobaan front wing pada wind tunnel; (b) grafik percobaan rear wing pada wind tunnel; (c) grafik pengaruh ketinggian rear wing dengan gaya angkat; (d) hasil penelitian akhir[1]*

Pada *rear wing* ternyata, posisi ketinggian *wing* juga berpengaruh pada gaya angkat yang terjadi, pada percobaan didapatkan gaya angkat tertinggi terjadi pada 1400 mm di atas datum. Hasil penelitian **Wordley dan Saunders** ditunjukkan pada gambar 2.15(d) yaitu koefisien *lift* menjadi -2,57 (*downforce*) dan koefisien *drag* juga bertambah menjadi 1,33.

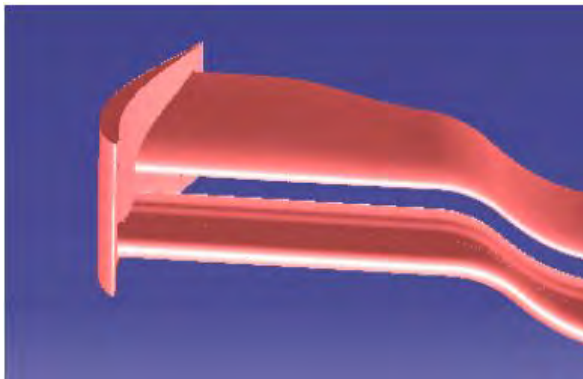
### 2.2.3 Penelitian desain *Front Wing* untuk Mobil Formula 1 dengan variasi penambahan *End Plate*, plat datar, dan *Angle Of Attack* oleh Mortel [2]

Pada tahun 2003 Mortel melakukan perancangan model *front wing* disertai simulasi untuk mengetahui  $C_d$  dan  $C_l$  dengan variasi *angle of attack* dan *design*. Model dasar *front wing* yang digunakan adalah GAW-1 yang banyak digunakan pada awal tahun 1900 untuk main *wing* dengan *angle of attack* -1.5 derajat. *Aspect ratio* yang digunakan adalah 5.4 dengan panjang *chord* tetap untuk pengujian dengan model yang akan dimodifikasi berikutnya. *Airfoil* pertama bertujuan untuk menerima momentum akibat tumbukan dengan fluida *free stream* dan diarahkan ke



*airfoil* kedua. *Airfoil* kedua bertujuan untuk menerima fluida *airfoil* pertama dan induksi fluida akibat putaran roda untuk menghasilkan *downforce*. Panjang *chord* untuk *airfoil* kedua divariasikan dengan sudut serang 16 derajat. Peraturan FIA tahun 2003 membolehkan adanya pengurangan tinggi kendaraan hingga 25 cm dari *center line*, sehingga *front wing* pada *midspan* dibuat melengkung mengikuti kontur *nose cone*. Ini bertujuan untuk menghindari tumbukan fluida yang telah melewati *nose cone* serta memaksimalkan luasan *front wing* yang menumbuk *free stream*.

Gambar 2.18 menjelaskan *End plate* yang digunakan untuk mengarahkan aliran fluida agar tidak bertumbukan dengan roda sehingga menghasilkan *drag* dan menambah *downforce*. *End plate* menggunakan *airfoil* tipe NACA 68005 dengan sudut serang 12 derajat. *Airfoil* tipe ini memiliki *chamber* maksimal 0.4 *chord* dan 5% ketebalan.

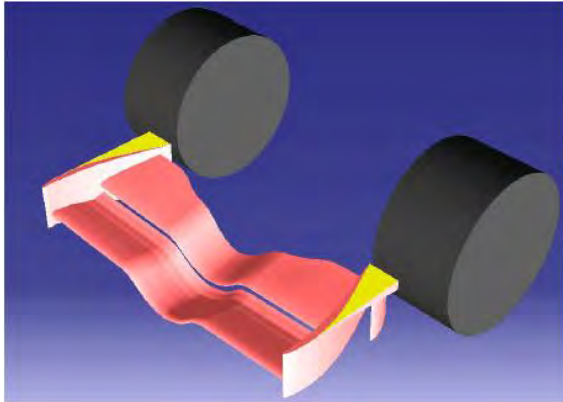


Gambar 2.18 Gambar model dasar dengan *airfoil* GAW-1 dan *end plate* NACA 68005[2]

Pada pengembangan model pertama, *front wing* ditambah satu plat datar di atas yang ditunjukkan warna kuning pada gambar 2.19. Tidak ada perubahan bentuk dan geometri dari model dasar. Penambahan plat datar ini bertujuan untuk



mengarahkan aliran udara agar tidak menumbuk roda sehingga mengurangi drag. Selain itu plat datar juga berfungsi untuk menambah *downforce* dari induksi aliran akibat putaran roda depan.



*Gambar 2.19 Gambar penambahan incline flat plate pada pengembangan pertama[2]*

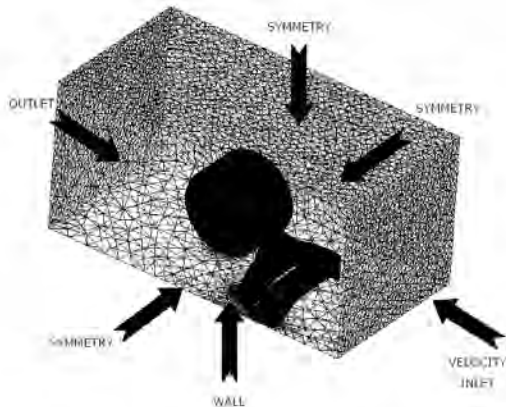
Pengembangan kedua dari model dasar front wing adalah penambahan *upper horizontal flat plate*, *lower horizontal flat plate*, *delta flat plate* dengan sudut serang  $12^0$ , dan pengecilan pada *airfoil* kedua seperti yang bisa dilihat pada gambar 2.20.



Gambar 2.20 Gambar pengembangan kedua dengan penambahan lower flat plate[2]

Boundary condition dari penelitian ini adalah kecepatan udara sebesar 60 m/s, tanah merupakan *moving wall* setara kecepatan udara, serta roda berputar dengan kecepatan sudut 181.82 rad/s. Sebelum dilakukan simulasi, desain dari *software* CAD dilakukan *meshing* dengan domain pemodelan pada gambar 2.21. Untuk mempermudah simulasi, simulasi hanya dilakukan setengah *body* karena bentuknya simetri. Beberapa metode *viscous solver* digunakan dalam simulasi ini.





*Gambar 2.21 Gambar meshing domain pemodelan simulasi[2]*

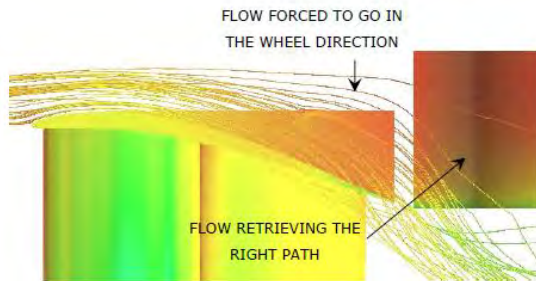
Setelah melakukan simulasi, didapatkan besarnya koefisien *lift* dan *drag* yang dinyatakan dalam table 2.1 berikut.

*Tabel 2.1 Tabel hasil simulasi tiga model front wing[2]*

Model	Viscous solver	Lift		Drag	
		$C_L$	Force (N)	$C_D$	Force (N)
Wing*	Spalart-Allmaras	-0.11	-280	1.31	1794
	k- $\epsilon$	-0.13	-308	1.36	1886
Basic	Inviscid	-0.28	-682	1.32	1898
	k- $\epsilon$	-0.26	-634	1.37	1964
No.1	Spalart-Allmaras	-0.26	-676	1.30	1860
No.2	Inviscid	-0.29	-736	1.32	1898
	k- $\epsilon$	-0.28	-720	1.32	1904

\* "Wing" is the two element wing without endplate.

Penambahan *end plate* dapat mengurangi drag akibat tumbukan fluida dengan roda. Pada gambar 2.22 dapat dilihat bahwa aliran fluida diarahkan ke sisi dalam roda menuju *side pontoon* untuk pendinginan mesin. Di sisi lain, dengan semakin sedikitnya fluida yang bertumbukan dengan roda, maka tekanan pada roda depan juga berkurang sehingga mengurangi gaya *drag*.



Gambar 2.22 Gambar pathlines pada end plate model pengembangan ke dua[2]

Penambahan plat datar pada end plate dari model dasar ke model pengembangan pertama tidak begitu berpengaruh pada koefisien *lift*. Namun penambahan satu lagi plat datar pada end plate pada pengembangan model ke dua menunjukkan penambahan koefisien *lift* sebesar 0.03.

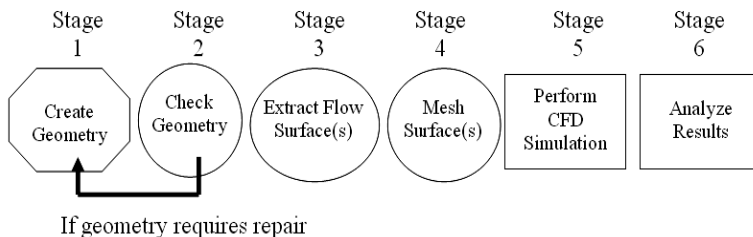
## 2.3 Numerical Modelling

### 2.3.1 Computational Fluid Dynamics (CFD)

*Computational fluid dynamics* (CFD) merupakan perangkat analisa system dengan melibatkan aliran fluida, perpindahan panas, *momentum*, perpindahan energi, dan fenomena aliran lain didasarkan simulasi berbantuan computer. CFD hakekatnya adalah perangkat *software* menggunakan *finite volume method* dengan memperlakukan fluida menjadi volume kecil-kecil dan melalui algoritma tertentu untuk menyelesaikan persamaan *Navier-Stokes*. Simulasi menggunakan CFD menghasilkan parameter-parameter penting seperti tekanan, suhu, kecepatan, dan laju alir massa (*mass flow rate*). Analisa menggunakan CFD diperlukan pemahaman dan pengetahuan dasar bidang mekanika fluida untuk interpretasi hasil-hasil simulasi. Penyederhanaan CFD terdiri dari tiga tahapan proses pengerjaan, yaitu *preprocessing* (spesifikasi geometri, pemilihan *turbulence model*, spesifikasi *parameter* dan *grid generation*) kemudian



*postprocessing (visualization dan treatment data)*. Prosedur CFD melalui tahapan seperti diagram pada gambar 2.23.



*Gambar 2.23 Blok diagram simulasi dengan CFD*

Sampai saat ini, CFD telah banyak digunakan dalam bidang aplikasi, baik untuk keperluan riset optimasi desain maupun untuk aplikasi praktis. Beragam industri dari *biomedical* dan farmasi sampai industri perminyakan dan *refinery* semua memanfaatkan untuk menganalisa sistem. Industri farmasi menggunakan untuk mensimulasikan enzim-enzim dalam tubuh manusia. Industri *refinery* menggunakan untuk mensimulasikan aliran ekstraksi gas-gas. Untuk optimasi desain, *aerodynamics* menggunakan untuk analisa *lift* dan *drag*. *Hydrodynamics* menggunakan untuk simulasi beban dinamis gelombang. *Power plant* memakai untuk mensimulasikan pembakaran dan perpindahan panas. *Turbomachinery* menggunakan untuk menganalisa aliran dalam *rotating passage*. *Electronic engineering* menggunakan untuk simulasi pendinginan *microcircuits*. *Chemical engineering* menggunakan untuk simulasi proses *mixing*. *Building engineering* menggunakan untuk analisa beban dinamis. *Marine engineering* menggunakan untuk simulasi beban *offshore structures*. *Environmental engineering* memakai untuk simulasi distribusi *pollutants*. *Hydrology* dan *oceanography* memanfaatkan untuk simulasi aliran sungai, pantai, dan laut. *Metrology* menggunakan untuk prediksi cuaca.



### 2.3.2 Deskripsi tentang RANS Turbulensi Model

- **Spalart–Allmaras:** Merupakan model turbulensi dengan satu persamaan yang menyelesaikan model persamaan *transport* untuk viskositas turbulen. Model ini didesain secara khusus untuk aplikasi *aerospace* yang melibatkan *wall-bounded flows* dan telah menunjukkan hasil yang baik untuk lapisan batas yang dipengaruhi *adverse pressure gradient*. Bentuk dasar model spalart – allmaras hanya efektif pada model dengan bilangan *Reynolds* yang kecil. Model ini dapat digunakan untuk simulasi yang relatif kasar dengan ukuran *mesh* yang besar, dimana perhitungan aliran turbulen yang akurat bukan merupakan hal yang kritis.
- **Standard  $k-\epsilon$ :** Pemodelan yang menggunakan persamaan *transport* untuk penyelesaian model  $k - \epsilon$ . Model ini juga dapat menyelesaikan untuk *heating*, *buoyancy* dan *compressibility* yang dapat diselesaikan dalam  $k-\epsilon$  model yang lainnya. Model tidak cocok untuk aliran kompleks yang meliputi *strong stream curvature* dan *separation*.
- **RNG  $k-\epsilon$ :** Variasi pemodelan dari *standard  $k-\epsilon$  model*. Model ini sangat signifikan untuk mengubah dalam persamaan  $\epsilon$ , sehingga dapat memperbaiki model yang mempunyai *highly strained flows*. Dalam model ini juga dapat digunakan untuk aliran yang mempunyai  $Re$  yang rendah dan untuk memprediksi aliran yang mempunyai efek *swirling*.
- **Realizable  $k-\epsilon$ :** Variasi pemodelan dari *standard  $k-\epsilon$  model*. Dengan menggunakan model ini dapat dilakukan untuk menentang penggunaan *mathematical constraints* sehingga dengan pemodelan ini cukup dapat memperbaiki performansi dari model tanpa menggunakan *mathematical constraints*.
- **Standard  $k-\omega$ :** Pemodelan yang menggunakan dua persamaan *transport* model untuk memecahkan  $k-\omega$ . Pemodelan ini juga dapat digunakan untuk aliran yang memiliki  $Re$  yang rendah. Pemodelan ini juga dapat menampilkan transisi aliran dari aliran laminar menuju



aliran turbulen. Keuntungan lainnya adalah dapat menghitung *free shear* dan aliran *compressible*.

- **SST  $k-\omega$ :** Variasi dari pemodelan *standard  $k-\omega$* . Mengkombinasikan pemodelan asli *Wilcox model* (1988) untuk menggunakan *near wall treatment* dan *standard  $k-\epsilon$  model*.
- **RSM:** Merupakan model turbulensi yang paling teliti pada *fluent*. Model RSM mendekati persamaan *Navier-Stokes (Reynoldss-averaged)* dengan menyelesaikan persamaan transport untuk tegangan *reynoldss* bersama-sama dengan persamaan laju dissipasi. Model ini menggunakan 5 persamaan transport, lebih banyak dibanding model turbulensi yang lain. Model RSM menghitung efek dari kurva *streamline*, pusaran (*swirl*), putaran, dan perubahan tiba-tiba pada aliran dengan lebih teliti daripada model turbulensi yang lain, sehingga dapat memberikan prediksi yang lebih akurat untuk aliran yang lebih kompleks.



## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

Dikarenakan keterbatasan alat ukur dan tuntutan visualisasi yang detail mengenai karakteristik aliran *spoiler* depan Mobil Formula SAE, maka penelitian ini menggunakan metode numerik dengan *software CFD*. Selain melakukan simulasi CDF untuk benda uji spoiler dengan roda, benda uji spoiler tanpa roda dan roda tanpa spoiler juga dilakukan. Tujuan dari simulasi tambahan ini adalah memperkaya data hasil simulasi sebagai pembandingan hasil simulasi spoiler dengan roda. Parameter untuk ketiga simulasi disamakan. Pada metode numerik ini ada tiga tahapan utama yang harus dilakukan, antara lain: *preprocessing*, *solving* atau *processing* dan *postprocessing*.

#### **3.1 *Preprocessing***

*Preprocessing* merupakan langkah pertama dalam membangun dan menganalisa sebuah model komputasi (*CFD*). Tahapan ini meliputi beberapa sub-tahapan antara lain: pembuatan geometri, penentuan domain, pembuatan *meshing* dan penentuan parameter-parameter yang digunakan.

##### **3.1.1 Geometri benda uji**

###### **3.1.1.1 Tipe *airfoil***

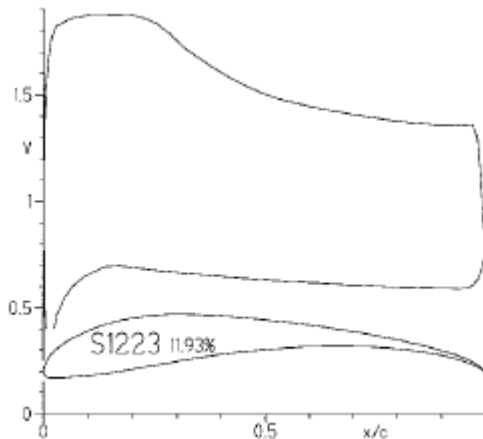
Salah satu *high lift-low Reynolds number airfoil* yaitu *asymmetric airfoil* tipe S1223 didesain oleh **Selig dan Guglielmo**[9]. Tujuan desai *airfoil* ini adalah mengakomodir kebutuhan aeronautika khususnya pesawat karena kendala landasan pacu yang pendek, mereduksi *noise*, dan menurunkan kecepatan *stall*. Proses desain *airfoil*



ini menggunakan metode *inverse* di mana *designer* menentukan distribusi tekanan pada *section side* dan *pressure side* untuk menentukan bentuk *airfoil*. Model S1223 mengacu pada model *airfoil* Wortmann FX 63-137 dan Miley M06-13-128.

Model Wortmann FX 63-137 memiliki  $Cl_{max}$  sebesar 1.75 dan baru akan terjadi *stall* di atas sudut serang  $20^{\circ}$ . Sedangkan model Miley M06-13-128 memiliki  $Cl_{max}$  1.52 dan akan mengalami *stall* dengan *gradient* yang drastis pada sudut serang  $14^{\circ} - 18^{\circ}$ . Karakteristik kedua model ini dirasa kurang mengakomodir permasalahan yang ada.

Setelah melakukan penentuan target distribusi tekanan pada *suction side* dan *pressure side*, maka didapatkan bentuk dari model S1223 yang ditunjukkan pada gambar 3.1.

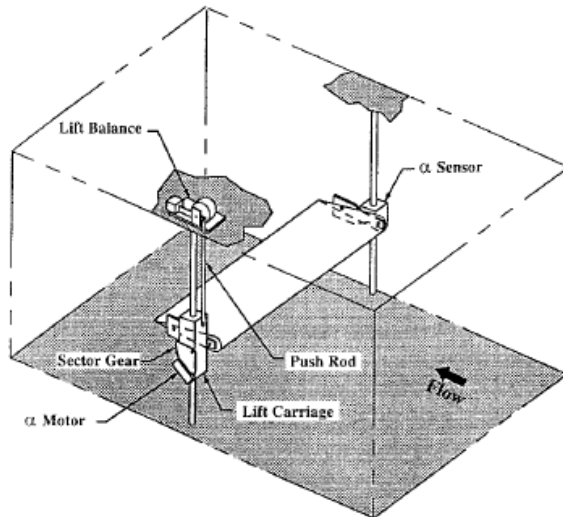


Gambar 3.1 Distribusi kecepatan pada airfoil tipe S1223[9]

Pengujian dilakukan dengan *wind tunnel* di University of Illinois at Urbana-Champaign dengan panjang chord 22 inci, panjang span 33 5/8 inci, dan ketebalan 11.93%



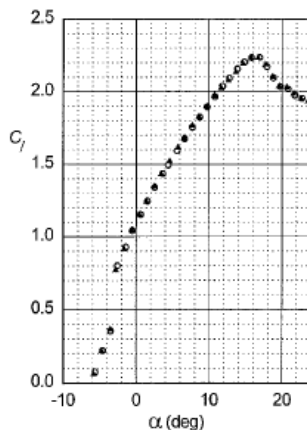
dengan domain pengujian pada gambar 3.2. *Airfoil* S1223 diuji pada *Reynolds number*  $10^5$  dan  $2 \times 10^5$ .



Gambar 3.2 Domain pengujian airfoil S1223[9]

Data hasil pengujian menunjukkan model S1223 menghasilkan koefisien *lift* sebesar 2.23 pada sudut serang  $18^\circ$  pada *Reynolds number*  $2 \times 10^5$  dilihat dari gambar 3.3. Hasil yang didapatkan sesuai dengan prediksi dan target desain sebesar 2.2. Jika dibandingkan dengan model model lain, model S1223 memiliki koefisien lift terbesar.





(a)

Airfoil	$C_{l,max}$	$C_{m,c/4}$	$Re$
E214	1.25	-0.11	$2 \times 10^5$
E423	2.00	-0.25 <sup>a</sup>	$2 \times 10^5$
FX 63-137	1.75	-0.17 <sup>a</sup>	$2 \times 10^5$
M06-13-128	1.52	0.00 <sup>a</sup>	$2 \times 10^5$
LA2573A	1.86	0.02	$2.5 \times 10^5$
LNv109A	1.87	-0.02	$2.5 \times 10^5$
S1223	2.23	-0.29 <sup>a</sup>	$2 \times 10^5$
S3021	1.17	-0.07	$2 \times 10^5$

(b)

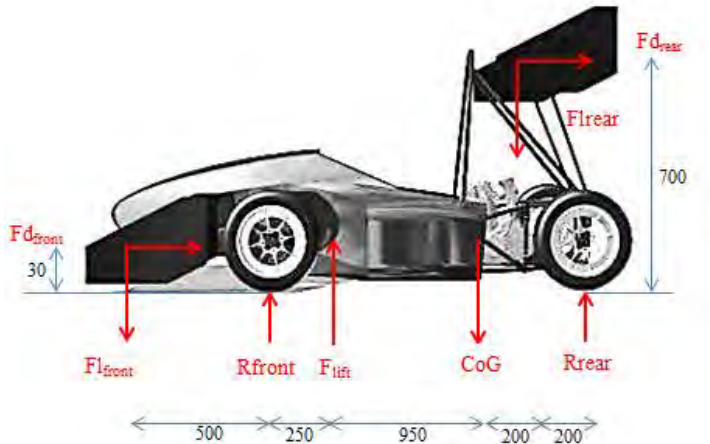
*Gambar 3.3(a) karakteristik  $C_l$  terhadap angle of attack; (b) perbandingan  $C_{l,max}$  beberapa tipe airfoil high lift-low Reynolds number[9]*

### 3.1.1.2 Panjang *span*, *chord*, dan geometri *end plate*

Pembuatan geometri *spoiler* ini menggunakan software *Autodesk Inventor*. Adapun geometri dari *spoiler* depan Mobil Formula SAE yang akan dipasangkan pada



Mobil Sapuangan *Speed* dapat didekati dengan menghitung kebutuhan *downforce* akibat penambahan *spoiler* belakang yang sudah diteliti oleh Arif [3].



Gambar 3.4 Gaya-gaya yang bekerja pada mobil sapuangan *speed 1*

Gambar 3.4 menunjukkan gaya-gaya yang bekerja pada mobil Sapuangan *Speed 2* pada kecepatan 40 km/jam. Setelah dilakukan simulasi numerik oleh Arif [3], maka didapat *downforce* pada *spoiler* belakang sebesar 164.438 N, berat *spoiler* balakang sebesar 117.72 N, dan gaya *drag* spoiler belakang sebesar 31.3 N. Parameter lain dapat dilihat pada tabel 3.1 yang merupakan hasil simulasi aliran melewati *single body* Mobil Sapuangan *Speed* dengan batasan mengabaikan putaran roda.



Tabel 3.1 Tabel parameter pada *spec sheet data* Mobil Sapuangin *Speed*[10]

No	Parameter	Besar
1	Berat mobil (m)	240 kg
2	<i>Aero balance</i>	46% L
3	<i>Cl single body</i>	0.45
4	Luas <i>plane</i> mobil	2.21 m <sup>2</sup>

Sesuai dengan filosofi desain spoiler depan yaitu mengimbangi moment akibat penambahan spoiler belakang, maka kebutuhan *downforce* pada *spoiler depan* dapat didekati dengan persamaam *moment* pada roda belakang :

$$\Sigma M_{RW} = 0$$

$$(F_{l_{front}} + W_{s_{front}}) (2.1 \text{ m}) - F_{d_{front}} (2.1 \text{ m}) - R_{front} (1.6 \text{ m}) - F_{lift} (1.15 \text{ m}) + W (0.4 \text{ m}) + (F_{l_{rear}} + W_{s_{rear}}) (0.2 \text{ m}) - F_{d_{rear}} (0.7 \text{ m}) = 0$$

Jika  $(F_{l_{front}} + F_{d_{front}})$  diganti  $F$  dan gaya *drag spoiler depan* diabaikan, maka persamaannya menjadi :

$$2.1 \text{ m } F - R_{front} (1.6 \text{ m}) - \left( \frac{\rho V^2 A C_l}{2} \right) (1.15 \text{ m}) + W (0.4 \text{ m}) + (F_{l_{rear}} + W_{s_{rear}}) (0.2 \text{ m}) - F_{d_{rear}} (0.7 \text{ m}) = 0$$

$$2.1 \text{ m } F - 659.39 \text{ N } (1.6 \text{ m}) - \left( \frac{1.225 \text{ kg/m}^2 (11.11 \text{ m/s})^2 2.21 \text{ m}^2 0.45}{2} \right) \text{ N } (1.15 \text{ m}) + 2400 \text{ N } (0.4 \text{ m}) + 282.15 \text{ N } (0.2 \text{ m}) - 31.3 \text{ N } (0.7 \text{ m}) = 0$$

$$2.1 \text{ m } F - 1055.02 \text{ Nm} - 86.457 \text{ Nm} + 960 \text{ Nm} + 56.43 \text{ Nm} - 21.92 \text{ Nm} = 0$$

$$F = \frac{168.465 \text{ Nm}}{2.1 \text{ m}}$$

$$F = 80.221 \text{ N}$$



*Spoiler* depan terbagi menjadi dua yaitu sebelah kiri dan kanan *leading edge body*, sehingga tiap bagian harus menghasilkan minimal setengah dari *downforce* yang dibutuhkan. Pendekatan untuk mencari luas *area spoiler* dapat dicari dengan persamaan 2.17. Model *airfoil* S1223 memiliki koefisien *lift* sebesar 2.23 pada angle of attack  $18^{\circ}$ . Dengan *density* udara pada *ambient temperature*  $30^{\circ}\text{C}$  sebesar  $1.125\text{ kg/m}^3$  dan kecepatan udara  $11.11\text{ m/s}$ , maka didapat luas *area spoiler* depan sebesar  $0.252\text{ m}^2$ . Sesuai dengan aturan FSAE Japan 2014 yang mengatur batasan lebar *aerodynamic devices*, maka *space* yang tersedia hanya 420 mm, sehingga panjang *chord spoiler* depan adalah 647 mm.

### 3.1.1.3 *Ground clearance* dan *gap* antara *wing*-roda

Banyak penelitian yang membahas interaksi antara *spoiler* depan dan roda depan yang berputar baik pengaruhnya terhadap  $C_L$  *spoiler* maupun  $C_D$  roda. Sayangnya, hanya sedikit penelitian dengan topik ini yang dipublikasikan itupun hanya menyampaikan kesimpulan secara general tanpa mencantumkan data kuantitatif secara *experiment* ataupun simulasi numerik.

Keberadaan *wing* di depan roda mempengaruhi karakteristik aliran udara di sekitarnya. Van den Berg[11] menyatakan bahwa roda yang berputar akan menghasilkan *boundary layer* yang akan terus menebal seiring dengan meningkatnya kecepatan putaran. Fackrell[12] juga menyatakan bahwa separasi pada roda akan diperlambat seiring dengan bertambahnya ketinggian *wing* terhadap *ground* diiringi dengan meningkatnya  $C_D$ . Untuk menentukan ketinggian *wing*, penelitian ini menggunakan landasan aturan FSAE Jepang tentang *ground clearance*



dimana seluruh bagian kendaraan tidak boleh menyentuh tanah selama *track event*. Maka dengan mempertimbangkan performa suspensi, maka *ground clearance* dari *spoiler* adalah 40 mm.

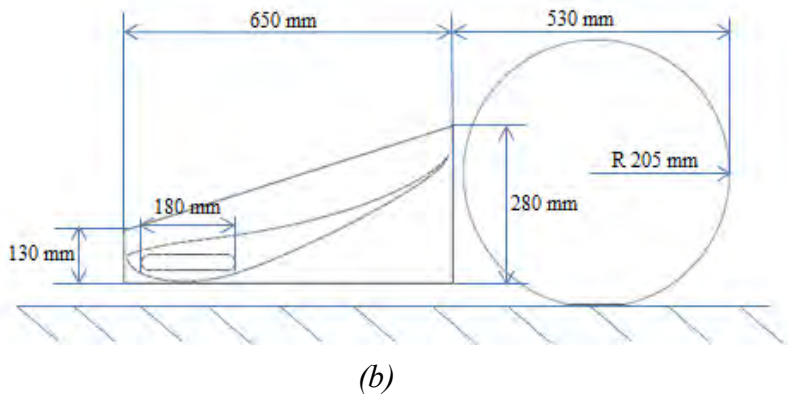
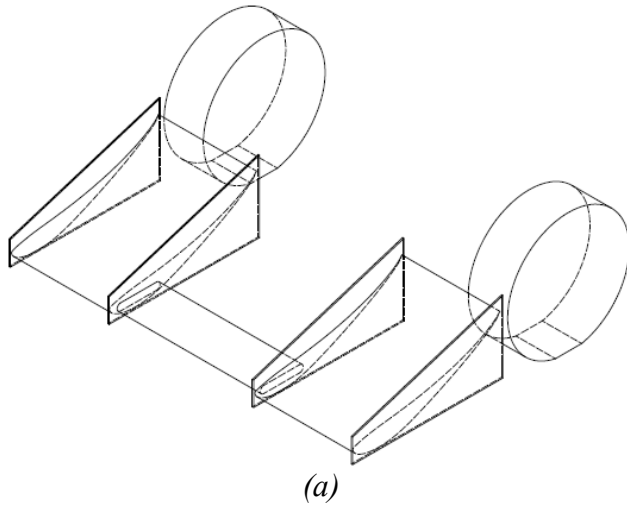
Jarak antara *wing* dan roda mempengaruhi nilai  $C_L$  *wing* dan  $C_D$ . **Van den Berg** melakukan penelitian pengaruh *gap* antara keduanya dengan variasi *gap* antara 15 mm sampai 50 mm. *Gap* 20 mm menghasilkan pengaruh paling baik dimana menghasilkan  $C_L$  yang tinggi untuk *wing* dengan  $C_D$  yang rendah untuk roda dibanding dengan *gap* lainnya.

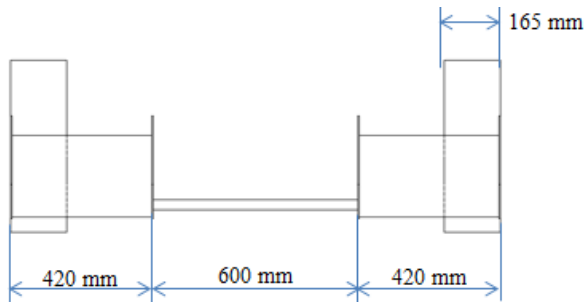
Geometri spoiler depan yang akan dipasang pada Mobil Formula SAE ditunjukkan pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Tabel geometri spoiler depan mobil formula SAE

Parameter	Dimensi
<i>Chord</i> (C)	647 mm
<i>Span</i> (s)	840 mm
<i>Aspect Ratio</i> (AR)	1.21
<i>Angle of Attack</i>	$18^0$
Tinggi <i>spoiler</i> (h)	280 mm
Panjang <i>spoiler</i> (L)	650 mm
<i>Ground clearance</i>	40 mm
<i>Gap spoiler-roda</i>	20 mm

Isometri spoiler dilihat secara tiga dimensi, sisi samping, dan sisi depan dapat dilihat pada gambar 3.5.



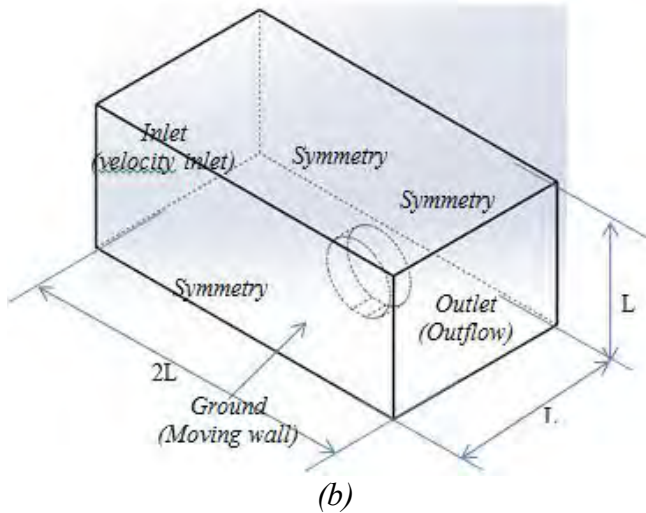
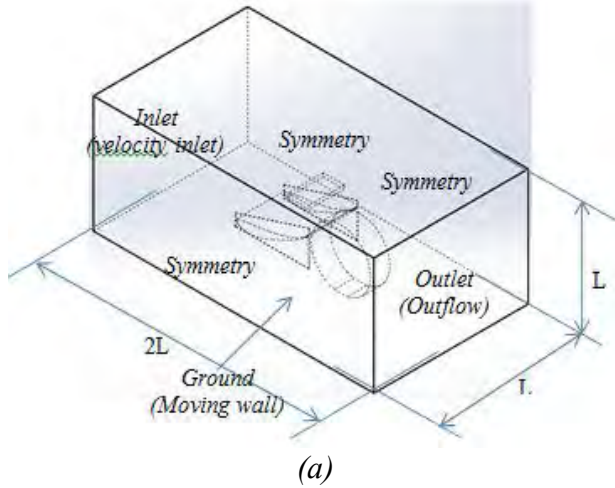


(c)

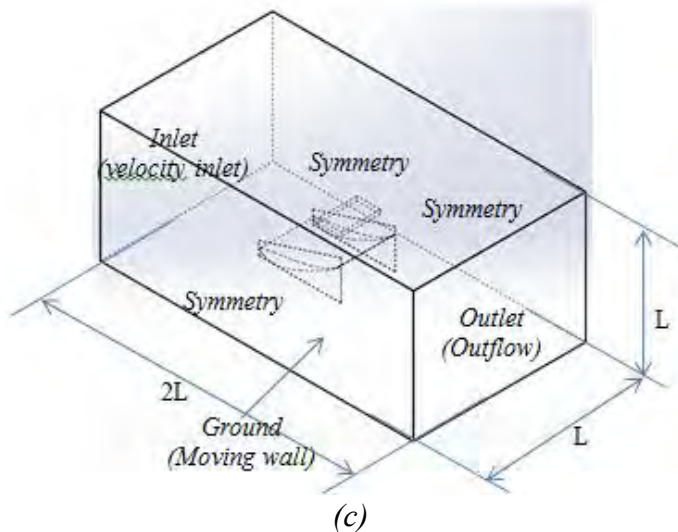
*Gambar 3.5 (a) isometri tiga dimensi, (b) isometri tampak samping, (c) isometri tampak depan wing depan mobil formula SAE*

### 3.1.2 Domain pemodelan

Penentuan dimensi domain merujuk pada penelitian berbasis *vehicle aerodynamics* yang dilakukan oleh **Mortel [2]** dengan menggunakan model turbulensi  $k-\varepsilon$  46sometric46. Gambar 3.6 menunjukkan 46sometric domain pemodelan penelitian ini.



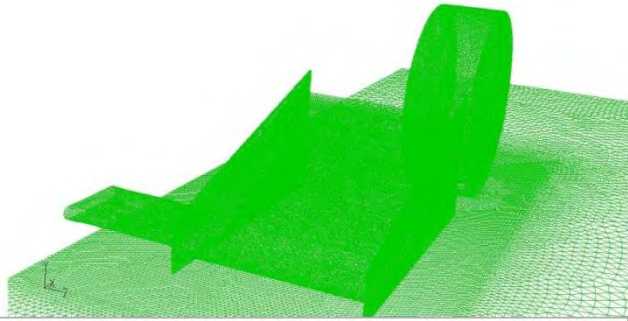




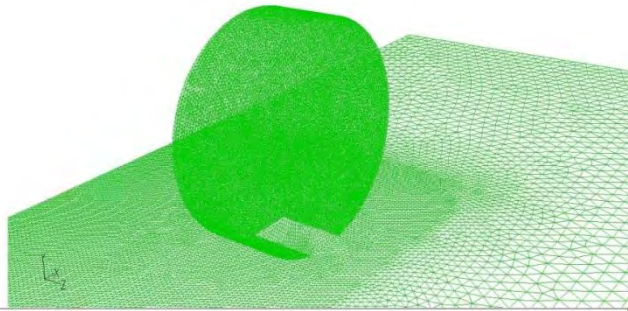
*Gambar 3.6 Gambar domain pemodelan simulasi (a) spoiler dengan roda, (b) roda saja, (c) spoiler saja*

### 3.1.4 Meshing

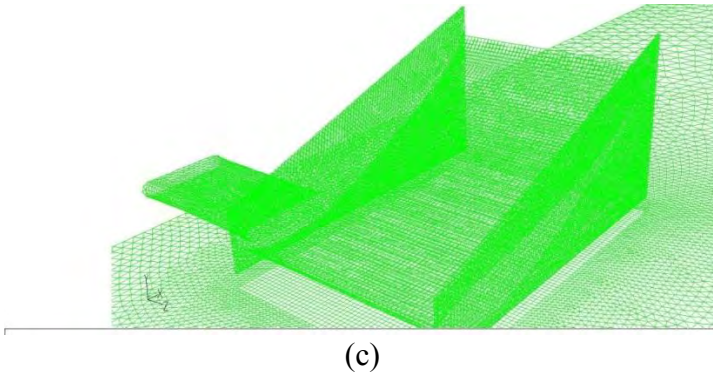
Bidang atau volume yang diisi oleh fluida dibagi menjadi sel-sel kecil (*meshing*) sehingga kondisi batas dan beberapa parameter yang diperlukan dapat diaplikasikan ke dalam elemen-elemen kecil tersebut. Pada pemodelan 3D digunakan *Tet/Hybrid*. *Grid meshing* 3D untuk ketiga benda uji ditunjukkan pada gambar 3.7.



(a)



(b)



(c)  
Gambar 3.7 (a) meshing spoiler dengan roda, (b) meshing roda tanpa spoiler, (c) meshing spoiler tanpa roda

### 3.1.4 Parameter Pemodelan

#### 3.1.4.1 Models

Model yang digunakan adalah model turbulen *k-ε realizable (RKE)*. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan hasil yang akurat pada kontur, baik tekanan maupun kecepatan. Selain itu, *k-ε realizable (RKE)* cocok digunakan untuk memodelkan aliran yang mengalami efek *swirling*. Evaluasi pemilihan model turbulen ini merujuk pada penelitian **Nicholas et al [14]**.

#### 3.1.4.2 Materials

Dalam tahap ini menetapkan jenis material yang akan digunakan serta memasukkan data-data *properties* dari material tersebut. Pada pemodelan ini dipilih udara sebagai fluida kerja dengan densitas ( $\rho$ ) : 1,225 kg/m<sup>3</sup> dan viskositas ( $\mu$ ) : 1,7894 x 10<sup>-5</sup> kg/m.s.



### 3.1.4.3 *Operating conditions*

*Operating Conditions* merupakan perkiraan kondisi daerah operasi yang biasanya merupakan perkiraan tekanan pada daerah operasi yaitu 1 atm atau 101325 pa.

### 3.1.4.4 *Boundary conditions*

*Boundary Conditions* merupakan penentuan parameter-parameter dan batasan yang mungkin terjadi pada aliran. *Boundary condition* pada *inlet* digunakan *velocity inlet* dengan kecepatan ke arah sumbu x sebesar 9 m/s, 18 m/s, dan 30 m/s dan 51 relative 51 re sebesar 300 K. Kecepatan inlet didasarkan pada kecepatan mobil pada event akselerasi, rata-rata kecepatan skid-pad, autocross, dan endurance & efficiency, serta top speed.

*Boundary condition* pada *outlet* adalah *outflow*. *Boundary condition* untuk *ground* adalah *moving wall* dengan kecepatan sama dengan kecepatan *inlet*. Kondisi ini ditujukan untuk merepresentasikan kondisi *real* dimana mobil berjalan di atas *ground*, meskipun tidak akan terjadi kecepatan 51 relative antara *ground* dan *freestream*. Hal ini menjadi konsekuensi kondisi tersebut, karena jika *ground* dibiarkan diam maka *boundary layer* akan terbentuk di depan *inlet* sehingga *freestream* yang akan menumbuk *spoiler* depan dalam keadaan *low momentum*.

*Boundary condition* untuk roda adalah kecepatan *angular* sebesar kecepatan *inlet* dibagi radius roda baik pada roda dengan *spoiler* maupun roda tanpa *spoiler*. *Boundary Condition* pada kontur *spoiler* depan adalah *wall*. *Boundary Condition* bagian samping kanan, kiri, dan atas (3D-flow) berupa *symmetry*.



#### **3.1.4.5 Solution**

Solusi pada penelitian ini adalah menggunakan *second order* untuk *pressure*, *second order upwind* untuk *momentum* *turbulent kinetic energy* dan *turbulent dissipation rate*.

#### **3.1.4.6 Initialize**

*Initialize* merupakan penentuan nilai awal yang dihitung dari salah satu kondisi batas agar lebih memudahkan untuk konvergen dan diinputkan dari *inlet*.

#### **3.1.4.7 Monitor residual**

*Monitor Residual* adalah tahap penyelesaian masalah, berupa proses iterasi hingga mencapai harga *convergence criterion* yang diinginkan. *Convergence criterion* ditetapkan sebesar  $10^{-5}$ , artinya proses iterasi dinyatakan telah konvergen setelah *residual*-nya mencapai harga di bawah  $10^{-5}$ .

### **3.2 Processing atau solving**

Dengan bantuan software *CFD*, kondisi-kondisi yang telah ditetapkan pada saat *preprocessing* akan dihitung (diiterasi). Jika kriteria konvergensi tercapai dengan kriteria konvergensi  $10^{-5}$  maka tahapan dilanjutkan pada *postprocessing* dan jika tidak tercapai tahapan akan mundur ke belakang pada tahapan pembuatan *meshing*.

### **3.3 Postprocessing**

*Postprocessing* merupakan penampilan hasil serta analisa terhadap hasil yang telah diperoleh berupa data kualitatif dan data kuantitatif. Data kuantitatif berupa distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada bidang potong  $z/s =$



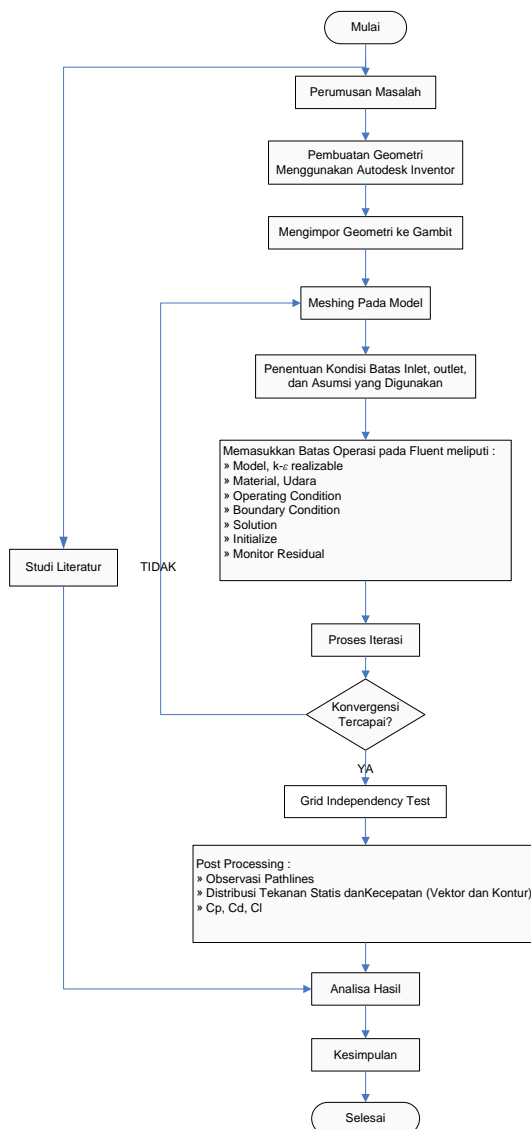
0.25 yaitu daerah di dekat body mobil,  $z/s = 0.5$  yaitu midspan dari spoiler, dan  $z/s = 0.81$  yaitu daerah depan roda. Koefisien *drag* ( $C_d$ ) dan koefisien *lift* ( $C_l$ ) didapat dari ekstraksi gaya *drag* dan *lift* pada spoiler yang kemudian dihitung secara manual. Sedangkan data kualitatif berupa visualisasi aliran dengan menampilkan *grid display*, *pathlines*, plot kontur, plot 53ector dan profil kecepatan digunakan untuk mendukung data kuantitatif  $C_p$  dan menunjukkan fenomena aliran.

### 3.4 Tahapan Penganalisaan

Beberapa tahapan penganalisaan yang diperlukan untuk mengetahui karakteristik aliran 3D disekitar *spoiler* Mobil FSAE adalah dengan penganalisaan aliran 3D yang disajikan dalam bentuk analisa distribusi  $C_p$ , tampilan 53ector kecepatan, kontur tekanan dan visualisasi *pathlines*.

### 3.5 Flowchart Metode Penelitian

Gambar 3.9 menjelaskan metode penelitian yang dipakai dalam penganalisaan karakteristik aliran pada *spoiler* :



*Gambar 3.8 Flowchart metodologi penelitian*



## BAB IV

### ANALISA DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 *Grid Independency*

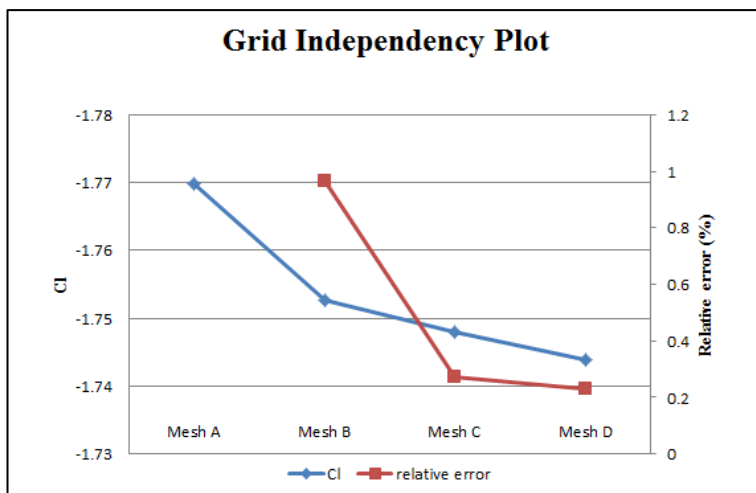
Dalam studi numerik yang menggunakan *perangkat lunak komersial* ini diperlukan keakuratan data baik pada langkah *post-processing* maupun *pre-processing*nya. Hal ini dilakukan agar data yang diperoleh dapat divalidasi pada aplikasi sebenarnya. Untuk itu diperlukan langkah *grid independensi* untuk menentukan tingkat serta struktur *grid* terbaik agar hasil pemodelan mendekati sebenarnya.

*Grid independency* dilakukan dengan melakukan simulasi beberapa jumlah *cell* dalam *mesh* dengan kondisi batas yang sama. *Grid* terbaik bukanlah *mesh* dengan jumlah *cell* terbanyak, namun ketika dua atau lebih *mesh* menunjukkan perbedaan hasil yang tidak signifikan atau dengan kata lain hasilnya mulai konstan. Tabel 4.1 menunjukkan hasil simulasi beberapa *mesh* untuk *grid independensi* dengan membandingkan parameter koefisien *lift* (CI).

*Tabel 4.1 Tabel hasil simulasi beberapa mesh untuk grid independensi*

Nama	Jumlah cell	Gaya Lift	CI	error	$Y^+$ min
Mesh A	628.769	-27.381	-1.76974	-	3.191
Mesh B	724.724	-27.117	-1.75268	0.9642 %	2.118
Mesh C	1.024.765	-27.043	-1.7479	0.2729 %	1.932
Mesh D	1.100.038	-26.881	-1.74389	0.2293 %	4.410





Gambar 4.1 Grafik plotting CI dan relative error untuk Grid Independency

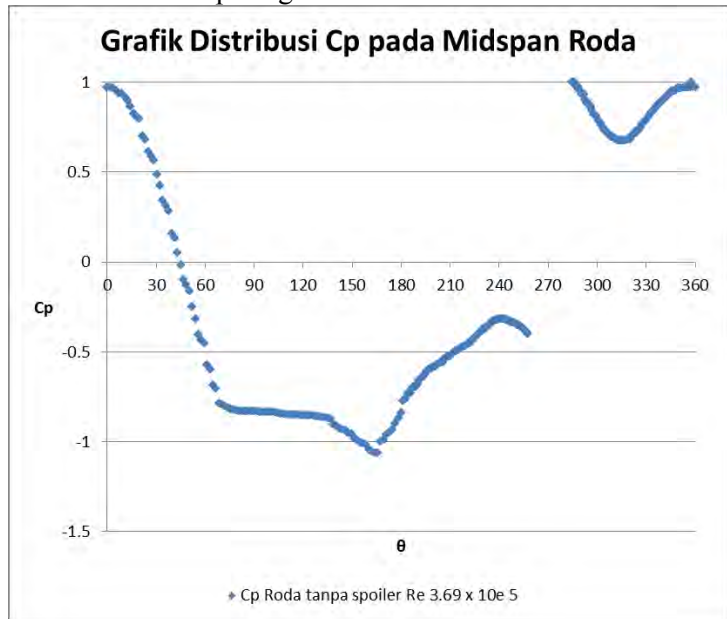
Dapat dilihat pada tabel 4.1 dan gambar 4.1 bahwa hasil simulasi *mesh A* dan *mesh B* memiliki *relative error* yang besar, yaitu 0.9%. Untuk jumlah *mesh* yang lebih besar, pada *mesh C* dan *mesh D*, hasil simulasi berupa CI mulai membentuk grafik yang konstan dengan *relative error* 0.22%. Nilai  $Y^+$  untuk keempat *mesh* menunjukkan angka 1.9 – 4.4, angka tersebut masih masuk dalam *range*  $Y^+$  untuk model *enhanced wall treatment*. Selain mempertimbangkan kedua aspek dalam *grid independency* tadi, ada satu aspek lagi yang perlu dipertimbangkan dalam menentukan *meshing* yaitu memandangkan nilai hasil simulasi dengan penelitian yang sudah ada. Hal ini sangat penting, mengingat *grid independency* tes tidak akan berarti jika nilainya jauh dari penelitian terdahulu. Hasil simulasi untuk benda uji *spoiler* saja menghasilkan nilai CI sebesar -2.28 untuk *Reynolds number*  $3.69 \times 10^5$ , sedangkan penelitian yang dilakukan oleh Selig [9] dengan *Reynold number*  $2 \times 10^5$  menghasilkan CI 2.23. Selisih 0.05 dirasa cukup layak untuk dipilih mengingat *Reynold number* pada simulasi lebih besar dari penelitian terdahulu. Dengan mempertimbangan



ketiga aspek tersebut, maka dari itu penelitian ini menggunakan *mesh C*.

#### 4.2 Analisa Karakteristik Aliran Melalui Roda Tunggal yang Berotasi

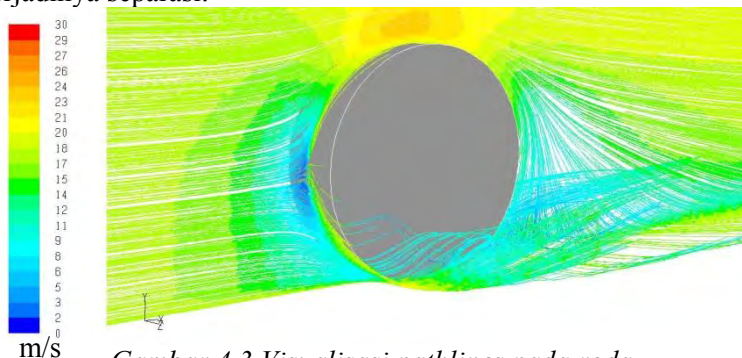
Perilaku aliran melalui roda berputar tidak jauh berbeda dengan perilaku aliran melalui silinder sirkular. Sama halnya dengan aliran tersebut, udara bebas akan menumbuk leading edge dari roda yang kemudian akan membentuk titik stagnasi. Titik stagnasi pada silinder diam baik aliran *inviscid* maupun *viscous* berada pada sudut  $0^0$ . Sedangkan titik stagnasi pada roda berputar akan bergeser mendekati tanah. Pergeseran titik stagnasi ini dikarenakan adanya aliran induksi akibat putaran roda sehingga titik stagnasi berada di kuadran empat. Titik stagnasi ditunjukkan daerah berwarna merah pada gambar 4.3.



Gambar 4.2 Grafik  $C_p$  pada midspan roda tunggal pada Reynold number  $3.69 \times 10^5$



Gambar 4.2 menunjukkan grafik distribusi  $C_p$  pada midspan roda berputar tanpa *spoiler* di depannya. Titik stagnasi ditandai dengan nilai  $C_p$  sebesar 1, pada kisaran sudut  $350^\circ$ . Setelah membentuk titik stagnasi, aliran akan terbagi menjadi dua yaitu melewati *upperside*, range sudut  $0^\circ$ - $180^\circ$  dan *lowerside*, range sudut  $180^\circ$ - $360^\circ$ . Aliran yang melalui daerah *upperside* akan dipercepat dari titik stagnasi sampai kisaran sudut  $63^\circ$ . Daerah dengan gradien tekanan negatif ini disebut *favorable pressure gradient*. Setelah melalui daerah ini, aliran akan diperlambat akibat *boundary layer* yang telah berkembang. Daerah ini disebut *adverse pressure gradient*. Momentum aliran yang melewati daerah ini akan terus turun dan akhirnya akan terjadi separasi aliran pada kisaran sudut  $70^\circ$ . Secara teoritis, grafik distribusi  $C_p$  pada aliran *inviscid* melalui silinder berbentuk grafik *sinusoidal*. Pada aliran *viscous* deviasi dari grafik yang seharusnya berbentuk *sinusoidal* merupakan titik terjadinya separasi.



Gambar 4.3 Visualisasi pathlines pada roda

Sama halnya aliran melalui *upperside*, aliran melalui *lowerside* akan dipercepat dari sudut  $360^\circ$  ke sudut  $320^\circ$  sebelum akhirnya diperlambat lagi hingga mencapai tanah. Aliran udara hampir dikatakan tidak akan melalui bagian bawah roda karena dibatasi oleh tanah. Oleh sebab itu aliran udara akan terpecah dan keluar melalui sisi samping kanan kiri roda seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.3.

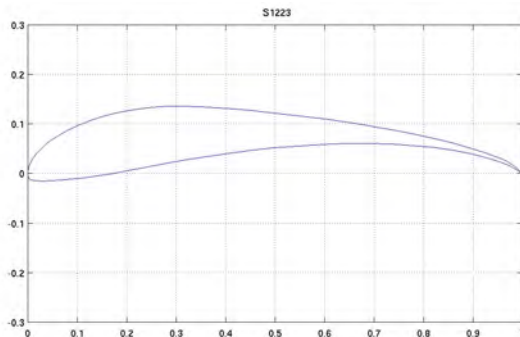


Satu hal yang paling disorot dari roda berputar pada dunia otomotif adalah gaya *drag* yang dihasilkan. Daerah di belakang titik separasi akan memiliki tekanan yang rendah. Daerah ini sering disebut *wake*. Perbedaan tekanan antara sisi depan roda dan sisi belakang roda akan menimbulkan *drag*, yang sering disebut *pressure drag*. Nilai koefisien *drag* yang dihasilkan oleh roda berputar pada simulasi ini adalah 4.837 N dengan nilai koefisien *drag* (Cd) sebesar 1.16. untuk *Reynolds number*  $3.69 \times 10^5$ .

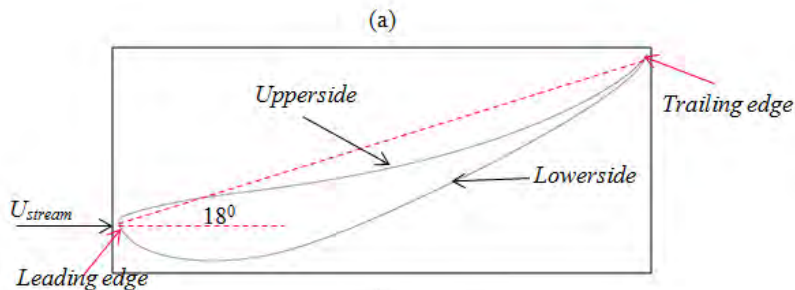
#### 4.3 Analisa Karakteristik Aliran Melalui *Spoiler* Tunggal dengan *Ground Effect*

Sebelum menganalisa aliran melewati *body* kompleks yaitu *spoiler* yang di belakangnya ada roda berputar, ada baiknya kita mengenal karakteristik aliran melalui *spoiler* itu sendiri tanpa ada roda di belakangnya. Hal ini sangat penting, mengingat *spoiler* merupakan *inverted airfoil* yang diposisikan pada *ground clearance* tertentu. Perilaku aliran pada sisi bawah *spoiler* akan berbeda karena timbul *ground effect*.

Analisa aliran 3 dimensi pada *airfoil* untuk *spoiler* depan ini ditinjau di tiga bidang yaitu bidang dekat *endplate* dalam,  $Z/S = 0.25$ , *midspan*,  $Z/S = 0.5$ , dan *midspan* roda,  $Z/S = 0.81$ . Analisa aliran 3 D ditunjukkan dengan data kuantitatif berupa grafik  $C_p$  yang didukung data kualitatif berupa visualisasi aliran yang meliputi *pathlines*, tampilan kontur kecepatan dan vektor kecepatan. Data kuantitatif  $C_p$  didapat dengan membagi selisih tekanan statis di titik sepanjang *side* dan udara bebas dengan tekanan dinamis udara bebas. Gambar 4.4 (a) menunjukkan bentuk *airfoil* S1223 dalam koordinat kartesian dengan *angle of attack*  $0^\circ$ . Gambar 4.4 (b) menunjukkan pembagian daerah *upper side* dan *lower side* pada *airfoil* dengan *angle of attack*  $18^\circ$ . Pembagian daerah *upper side* dan *lower side* dibatasi oleh titik *leading edge* dan *trailing edge*.



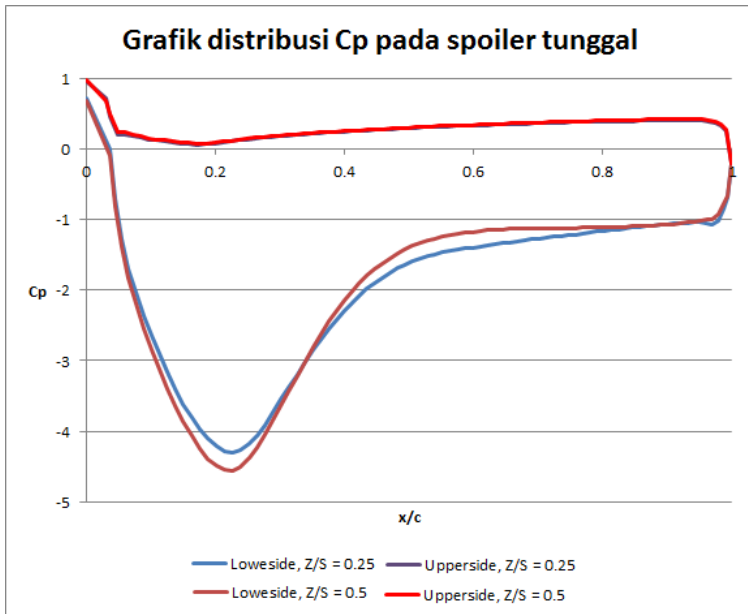
(a)



(b)

Gambar 4.4 (a) airfoil S1223 dengan angle of attack  $0^\circ$ , (b) pembagian daerah uppside dan lowerside airfoil S1223 dengan angle of attack  $18^\circ$

Sama halnya dengan aliran melalui silinder, aliran *freestream* akan menumbuk bagian tertentu dari *leading edge* yang kemudian membentuk titik stagnasi. Titik stagnasi merupakan titik di mana kecepatannya sama dengan nol tanpa proses friksi. Titik stagnasi pada spoiler dengan *angel of attack*, pada penelitian ini  $18^\circ$ , akan mengalami pergeseran ke daerah uppside pada  $x/c = 0.018$ . Setelah membentuk titik stagnasi, aliran akan terbagi menjadi dua yaitu melewati *upperside* dan *lowerside*.



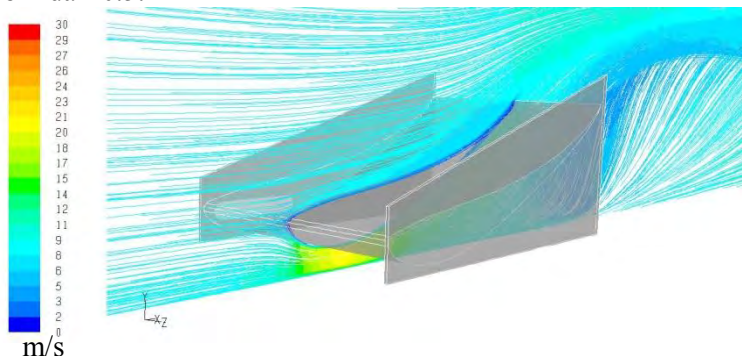
Gambar 4.5 Grafik distribusi  $C_p$  pada spoiler dengan Reynolds number  $3.69 \times 10^5$

Setelah membentuk titik stagnasi pada  $x/c = 0.018$ , aliran udara akan dipercepat sampai  $x/c = 0.18$ . Percepatan udara pada daerah ini ditunjukkan dengan menurunnya grafik  $C_p$ . Daerah ini disebut *favourable pressure gradient*. Setelah melalui daerah ini, aliran diperlambat karena perkembangan *boundary layer* pada *upperside*. Hal ini menyebabkan naiknya tekanan statis sehingga sering disebut daerah *adverse pressure gradient*. Daerah ini memiliki *range* dari  $x/c = 0.18$  sampai mendekati *trailing edge* sebelum aliran dipercepat ketika meninggalkan *spoiler*.

Tidak ada perbedaan yang signifikan pada grafik distribusi  $C_p$  bagian *upperside* untuk potongan  $z/s = 0.5$ , maupun  $z/s = 0.81$ . Namun, jika dilihat lebih seksama pada *range*  $x/c = 0.18$  sampai mendekati *trailing edge* terjadi sedikit perbedaan yaitu posisi grafik distribusi  $C_p$  pada  $z/s = 0.5$  yang berda di atas grafik



distribusi  $C_p$  pada  $z/s = 0.81$ . Fenomena ini terjadi akibat *side body effect* yaitu *tip vortices* yang terjadi akibat perbedaan tekanan *upper side* dan *lower side* yang efeknya dominan pada  $x/c$  lebih dari 0.5.



*Gambar 4.6 Visualisasi pathlines pada spoiler*

Aliran pada *lower side* dibatasi oleh dua permukaan yaitu bagian bawah dari *spoiler* dan *ground*. Jika dilihat pada arah sumbu  $z$  akan terlihat seperti gabungan antara *nozzle* dan *diffuser*. Hal inilah yang mengakibatkan aliran akan dipercepat dari titik stagnasi sampai  $x/c = 0.00$  dan kemudian diperlambat sampai mendekati *trailing edge*. Dipercepatnya aliran dapat dilihat dengan warna merah pada *pathlines* yang melalui *lower side* pada gambar 4.6. *Side body effect* juga terlihat pada grafik distribusi  $C_p$  untuk *lower side*. Grafik distribusi  $C_p$  untuk  $z/s = 0.25$  berada di bawah grafik distribusi  $C_p$  untuk  $z/s = 0.5$ .

Gaya *lift negatif* akan dihasilkan oleh *spoiler* karena *spoiler* merupakan *airfoil* yang dibalik, juga dapat dilihat dari grafik distribusi  $C_p$  pada gambar 4.5 di mana tekanan *upper side* lebih besar dari tekanan *lower side*. Terlebih lagi dengan adanya *ground effect* yang mempercepat aliran melalui *lower side* sehingga tekanan *lower side* lebih rendah dibandingkan *spoiler* yang tidak dibatasi *ground*. Gaya *downforce* yang dihasilkan oleh *spoiler* ini adalah 28.58 N dengan nilai koefisien *lift* ( $C_l$ ) sebesar -2.28.

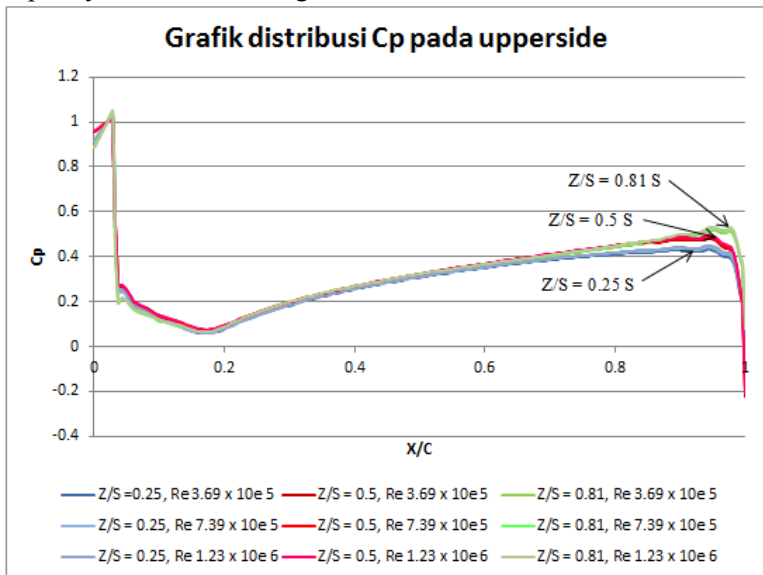


Selain menghasilkan *downforce*, *spoiler* juga menghasilkan gaya *drag* sebesar 5.73 N dengan koefisien *drag* ( $C_d$ ) sebesar 0.00.

#### 4.4 Analisa Karakteristik Aliran Melalui *Spoiler* dengan Roda yang Berotasi di Belakangnya

##### 4.4.1 Analisa medan aliran melalui *spoiler*

Setelah mengetahui pola aliran melalui roda berputar dan *spoiler* tunggal dengan pengaruh *ground effect*, analisa dilanjutkan dengan karakter aliran melalui *spoiler* yang dikombinasikan dengan roda berputar di belakangnya. Pola aliran melalui *spoiler* dengan roda memiliki perbedaan dengan pola aliran *spoiler* tunggal. Hal ini dikarenakan keberadaan roda di belakangnya. Keberadaan roda akan mempengaruhi aliran di depannya, terutama di bagian *lowside*.



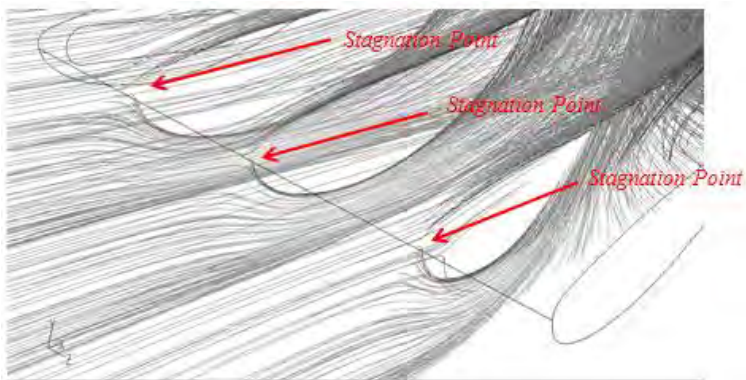
Gambar 4.7 Grafik distribusi  $C_p$  pada upsideside untuk  $Re = 3.69 \times 10^5$ ,  $Re = 7.39 \times 10^5$ , dan  $Re = 1.23 \times 10^6$

Udara *freestream* mengalir menuju *spoiler* kemudian menumbuk bagian *leading edge spoiler*. Sama halnya dengan

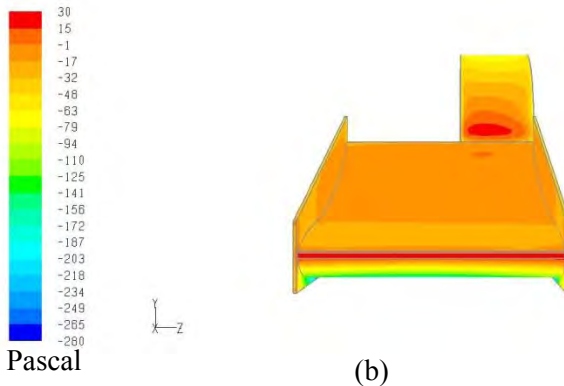




aliran melewati silinder sirkular, akan terjadi *stagnation point* di sekitar *leading edge*. Lokasi *stagnation point* ditunjukkan oleh nilai  $C_p$  sebesar 1 pada  $x/c = 0.018$ . Jika grafik pada gambar 4.7 dilihat secara sekilas, tidak ada perbedaan yang signifikan untuk posisi titik stagnasi ketiga bidang untuk ketiga variasi *Reynolds number*. Setelah membentuk *stagnation point*, aliran terbagi menjadi dua yaitu daerah *upper side* dan *lower side*. Visualisasi *pathline* pada gambar 4.8 (a) menunjukkan aliran udara melewati *leading edge* dan gambar 4.8 (b) menunjukkan kontur tekanan pada daerah *upper side*. Posisi *stagnation point* ditunjukkan oleh daerah berwarna merah pada *leading edge* pada gambar 4.8 (b).



(a)



Gambar 4.8 (a) stagnation point pada leading edge spoiler, (b) kontur tekanan pada uppside spoiler

Bagian *upperside* merupakan daerah *pressure surface*. Geometri bagian atas *spoiler* ini berbentuk *streamline*, sehingga aliran udara mengikuti bentuk dari *spoiler*.

Setelah melewati *stagnation point*, aliran udara dipercepat yang ditunjukkan dengan penurunan  $C_p$  dari *stagnation point* sampai  $x/c = 0.1725$ . Daerah di mana terjadi penurunan tekanan statis ini dinamakan *favorable pressure gradient*. Jika dilihat lebih seksama, pada daerah  $x/c = 0.03$  sampai  $x/c = 0.1725$  terjadi perbedaan nilai  $C_p$  dimana grafik  $z/s = 0.5$  berada di atas kedua grafik lainnya. Hal ini menunjukkan mulai terbentuknya fenomena *tip vortex* yang akan berpengaruh besar pada daerah dekat *trailing edge*.

Setelah itu, dari  $x/c = 0.1725$  sampai  $x/c = 0.8956$   $C_p$  naik secara perlahan. Daerah ini dinamakan *adverse pressure gradient*. Perbedaan distribusi  $C_p$  kembali terjadi pada daerah  $x/c$  di atas 0.8. Distribusi  $C_p$  pada bidang  $z/s = 0.5$  berada di atas distribusi  $C_p$  bidang  $z/s = 0.25$  dan di bawah distribusi  $C_p$  bidang  $z/s = 0.81$ . Perbedaan distribusi  $C_p$  ini menunjukkan perbedaan kecepatan pada ketiga bidang. Karakteristik aliran udara pada  $z/s = 0.5$  mendekati karakteristik aliran 2 dimensi. Aliran udara pada  $z/s = 0.25$  dipengaruhi oleh efek *upwash* yang mengakibatkan *tip vortices* sehingga grafik distribusi  $C_p$ -nya di bawah. Efek *upwash*

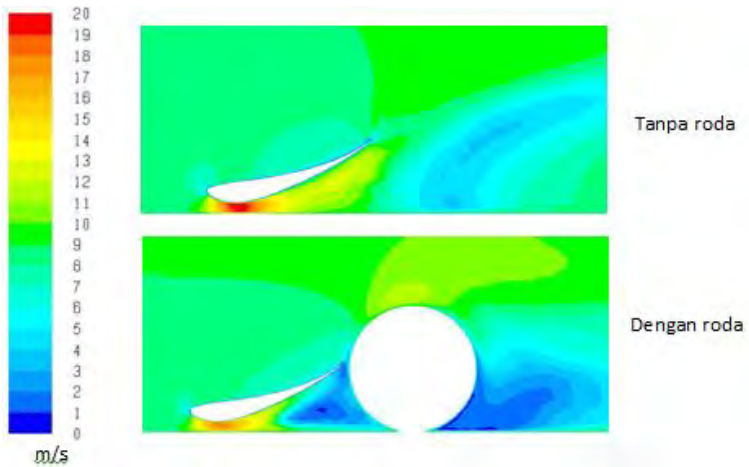


terjadi akibat perbedaan tekanan pada pressure side yaitu upperside dan suction side yaitu lowerside. Perbedaan tekanan ini mengakibatkan adanya aliran dari upperside ke lowerside. Sedangkan pada bidang  $z/s = 0.81$  aliran dihalangi oleh keberadaan roda di belakangnya sehingga grafik distribusi  $C_p$  berada di atas.

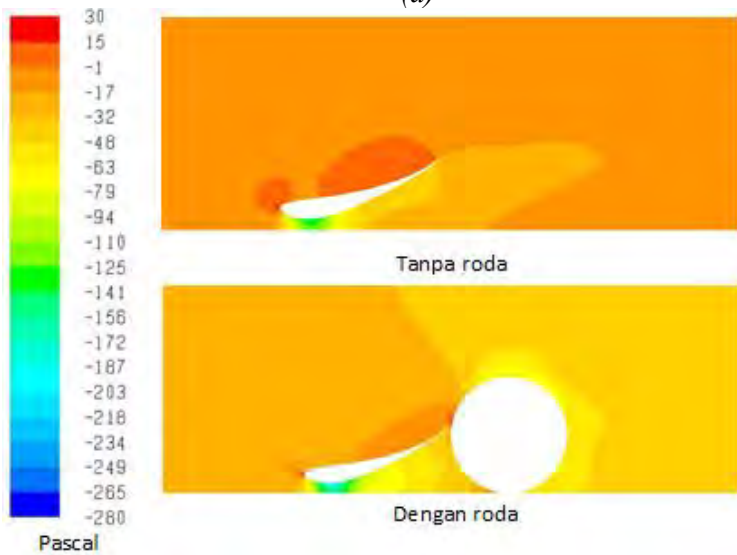
Mendekati *trailing edge*, aliran kembali dipercepat yang ditunjukkan penurunan  $C_p$  sampai  $x/c = 1$ .  $C_p$  pada *trailing edge* menunjukkan perbedaan untuk tiap potongan bidang  $z/s$ . Nilai  $C_p$  pada *trailing edge* potongan  $z/s = 0.5$  adalah -0.22, sedangkan nilai  $C_p$  pada *trailing edge* potongan  $z/s = 0.81$  adalah 0.07. Perbedaan nilai  $C_p$  menunjukkan perbedaan kecepatan aliran udara, aliran udara pada potongan  $z/s = 0.5$  lebih cepat daripada aliran udara pada potongan  $z/s = 0.81$ . Perbedaan ini diakibatkan oleh adanya roda di belakang *spoiler*. Roda yang berada di belakang *spoiler* menimbulkan *blockage effect* yang menghambat aliran pada potongan  $z/s = 0.81$ .

Secara umum, nilai  $C_p$  di setiap titik sepanjang *upperside* bidang  $z/s = 0.81$  lebih besar dari nilai  $C_p$  di setiap titik sepanjang *upperside* bidang  $z/s = 0.25$  maupun  $z/s = 0.5$ . Perbedaan nilai  $C_p$  pada ketiga bidang ini dipengaruhi oleh keberadaan roda berputar di belakang *spoiler*. Aliran udara pada bidang  $z/s = 0.25$  dan  $z/s = 0.5$  setelah melewati *trailing edge* akan mengalir menuju *freestream*, sedangkan pada bidang  $z/s = 0.81$  aliran udara akan melewati roda berputar.

Bagian *lowerside* merupakan bagian *suction side*. Aliran yang melewati *lowerside* dibatasi oleh dua bidang yaitu *lowerside spoiler* dan *ground*. Jika dilihat perpotongannya pada sumbu  $Z$ , maka daerah ini terlihat seperti gabungan *nozzle* dan *diffuser*. Dari *stagnation point* sampai  $x/c = 0.232$ , aliran udara dipercepat yang ditunjukkan dengan penurunan  $C_p$ . Kemudian aliran udara diperlambat dari  $x/c = 0.232$  sampai *trailing edge*. Gambar 4.9 menunjukkan kontur kecepatan pada potongan *spoiler* sejajar sumbu  $x$ . Visualisasi tersebut menguatkan analisa aliran udara di *lowerside* yang telah dijelaskan di atas.



(a)



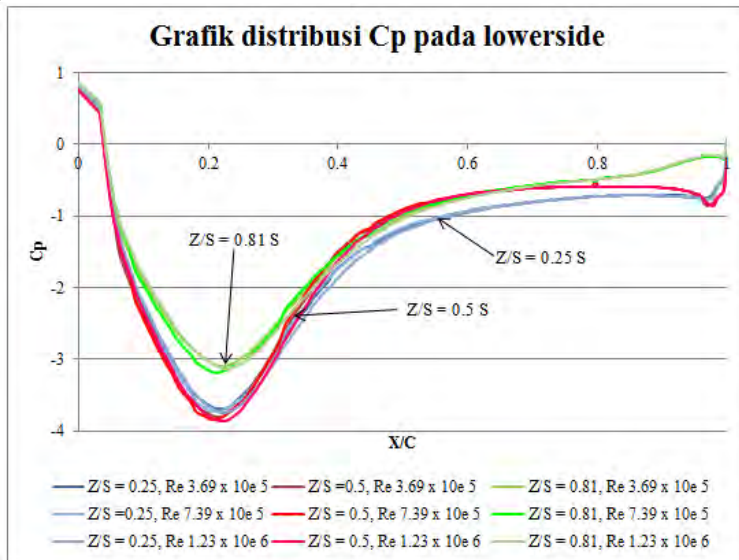
(b)

Gambar 4.9 (a) kontur kecepatan pada potongan spoiler  $z/s = 0.81$ , (b) kontur tekanan pada potongan spoiler  $z/s = 0.81$



Keberadaan roda di belakang *spoiler* menimbulkan *blockage effect* pada daerah *lowerside*. Efek ini ditunjukkan dengan membandingkan visualisasi kontur kecepatan pada gambar 4.9 (a). Pada visualisasi kontur kecepatan pada potongan *spoiler* dengan roda, *blockage effect* ditunjukkan oleh daerah berwarna biru di depan roda pada *lowerside*. Sedangkan pada potongan *spoiler* tanpa roda, aliran tidak disumbat apapun sehingga efek ini tidak terjadi.

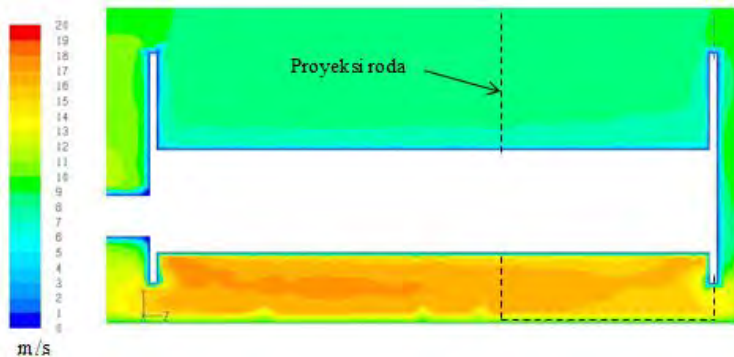
Sama halnya dengan aliran melalui *upperside spoiler*, terjadi perbedaan  $C_p$  di sepanjang *lowerside* untuk ketiga bidang potong  $z/s$  di titik yang sama.  $C_p$  pada potongan bidang  $z/s = 0.81$  yang berada di depan roda berputar selalu lebih besar dari pada  $C_p$  pada bidang  $z/s = 0.25$  maupun  $z/s = 0.5$ . Grafik distribusi  $C_p$  pada *lowerside* untuk ketiga *Reynolds number* ditunjukkan pada gambar 4.10 berikut.



Gambar 4.10 Grafik distribusi  $C_p$  pada lowerside untuk  $Re = 3.69 \times 10^5$ ,  $Re = 7.39 \times 10^5$ , dan  $Re = 1.23 \times 10^6$



Secara umum, grafik distribusi  $C_p$  pada ketiga potongan menunjukkan *trendline* yang sama. Grafik distribusi  $C_p$  pada potongan  $z/s = 0.25$  dan  $z/s = 0.5$  tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Nilai  $C_p$  minimum untuk potongan  $z/s = 0.25$  adalah -3.749 di titik  $x/c = 0.226$  pada  $Re\ 1.23 \times 10^6$  dan untuk potongan  $z/s = 0.5$  adalah -3.859 di titik  $x/c = 0.220$ . Sedangkan nilai  $C_p$  minimum untuk potongan  $z/s = 0.81$  adalah -3.129 pada titik  $x/c = 0.231$ . Nilai  $C_p$  pada potongan  $z/s = 0.81$  pada *range*  $x/c = 0.088$  sampai  $x/c = 0.36$  menunjukkan perbedaan yang signifikan dibandingkan nilai  $C_p$  pada potongan  $z/s = 0.25$  dan  $z/s = 0.5$  pada *range* yang sama. Grafik  $C_p$  potongan  $z/s = 0.81$  untuk ketiga *Reynolds number* berada di atas grafik  $C_p$  grafik lainnya pada *range* tersebut. Perbedaan ini diakibatkan oleh keberadaan roda di belakang spoiler. Roda tersebut menimbulkan *blockage effect* yang akan menghambat laju aliran di depannya. Menurunnya kecepatan aliran dapat dilihat dengan dengan tingginya nilai  $C_p$  pada potongan  $z/s = 0.81$  dibanding nilai  $C_p$  pada potongan yang lain.

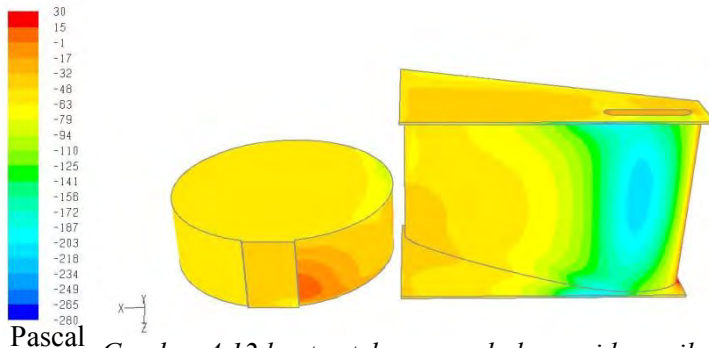


Gambar 4.11 Kontur kecepatan pada potongan  $x/c = 0.2$

Blockage effect akibat keberadaan roda mempengaruhi aliran dari leading edge spoiler. Gambar 4.11 menunjukkan kontur kecepatan pada potongan  $x/c = 0.2$ . Kecepatan aliran di depan roda terlihat lebih lambat dibanding di daerah lain. Maka dari itu grafik  $C_p$  pada daerah sekitar  $x/c = 0.2$  untuk  $z/s = 0.81$  lebih tinggi dari potongan lain pada gambar grafik 4.10.



Gambar 4.12 dibawah ini menunjukkan kontur tekanan pada *lowerside spoiler*. Daerah berwarna biru paling tua menunjukkan daerah dengan tekanan terkecil yang berpusat di midspan spoiler. Tekanan semakin membesar mendekati daerah *lowerside* dekat roda yang ditunjukkan oleh daerah berwarna kuning.



Gambar 4.12 kontur tekanan pada *lowerside spoiler*

*Blockage effect* juga terjadi di dekat *trailing edge*. Kecepatan aliran pada range  $x/c = 0.69$  sampai  $x/c = 1$  untuk potongan  $z/s = 0.81$  lebih kecil daripada potongan lainnya. Kecepatan aliran yang lebih kecil dari kecepatan aliran pada kedua potongan lainnya ditunjukkan oleh grafik yang dominan dengan warna hijau berada di atas grafik yang dominan dengan warna merah maupun biru. Keberadaan roda di belakan *spoiler* menghambat laju udara pada potongan  $z/s = 0.81$ .

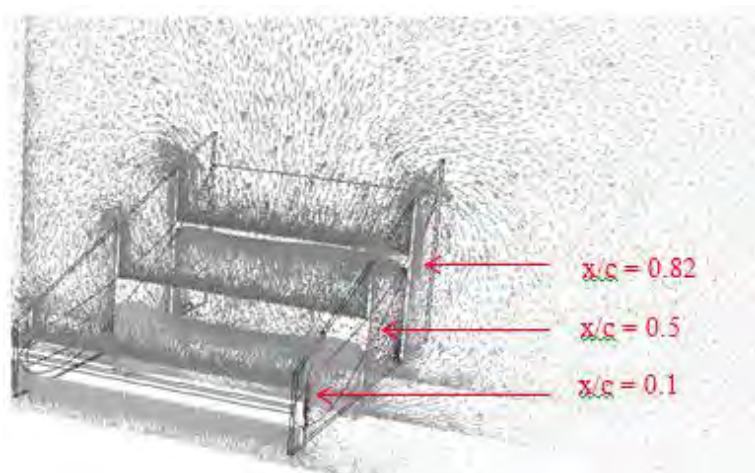
Secara umum, jika grafik distribusi  $C_p$  pada bidang yang sama baik *upper side* maupun *lowerside*, tidak memiliki perbedaan yang signifikan terhadap perubahan *Reynolds number*. Hanya beberapa daerah dengan range tertentu pada grafik distribusi  $C_p$  *lowerside* yang menunjukkan perbedaan yang bisa dilihat secara jelas, meskipun tidak signifikan. Hal ini disebabkan perhitungan  $C_p$  melibatkan tekanan statis pada *spoiler*, tekanan statis *freestream*, dan tekanan dinamis *freestream* yang nilainya hampir sama di tiap sembarang titik *spoiler*.





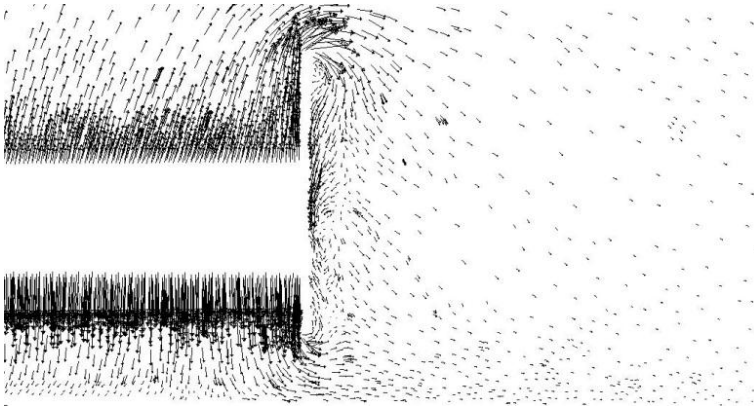
#### 4.4.2 Analisa medan aliran di sekitar *endplate*

Pada umumnya, jika aliran udara melewati sebuah *airfoil*, maka akan terjadi *efek upwash* di ujung ujung *airfoil*. Efek *upwash* adalah efek yang timbul akibat perbedaan tekanan pada sisi *upper side* dan *lower side* dari *airfoil*. Efek *upwash* ini sering terjadi sehingga mengurangi gaya *lift* atau *downforce*. Kronologi terjadinya efek *upwash* bermula dari perbedaan tekanan pada *upper side* dan *lower side* yang mengakibatkan adanya aliran dari sisi *pressure side* ke *suction side*. Pada penelitian kali ini *pressure side* adalah *upper side* dan *suction side* adalah *lower side*. Aliran udara dari *pressure side* ke *suction side* terus berkembang dari *leading edge* ke *trailing edge*. Gambar 4.13 menjelaskan fenomena yang terjadi di ujung ujung *airfoil*.

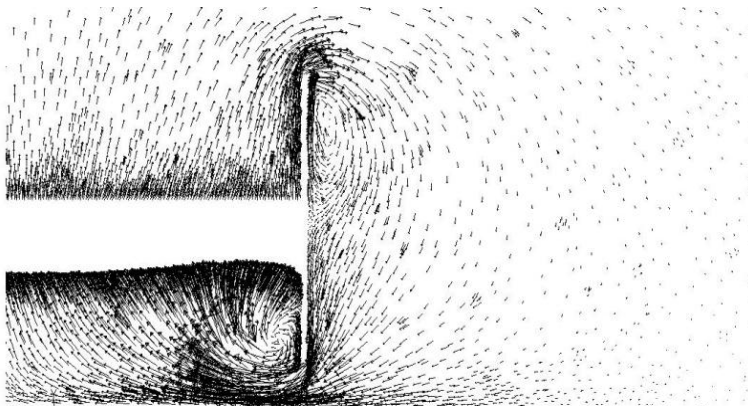


(a) bidang potong  $x/c = 0.1$ ,  $x/c = 0.5$ , dan  $x/c = 0.82$ .

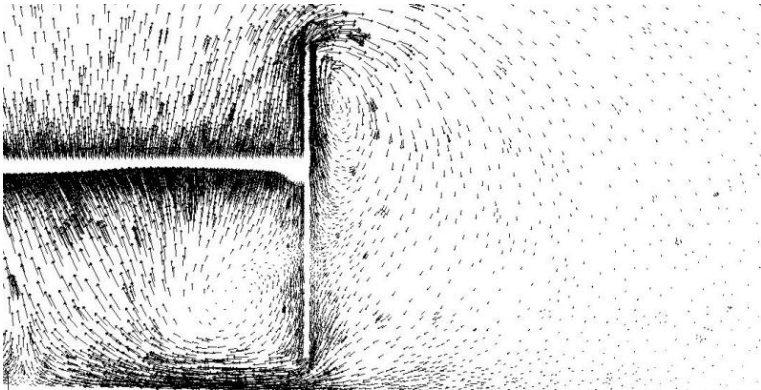




(b)  $x/c = 0.1$



(c)  $x/c = 0.5$



(d)  $x/c = 0.82$

Gambar 4.13 vektor kecepatan di sekitar endplate

Gambar 4.13 (b) merupakan potongan *spoiler* searah sumbu  $z$  pada  $x/c = 0.1$ . Potongan ini menunjukkan vektor kecepatan ke arah sumbu  $y$  dan  $z$ . *Tip vortices* sudah mulai terbentuk pada potongan ini yang ditunjukkan oleh vektor di sekitar *endplate* bagian atas. Kemudian *vortex* berkembang ke arah sumbu  $x$  yang ditunjukkan gambar 4.13 (c) yaitu pada potongan  $x/c = 0.5$ . Pada potongan  $x/c = 0.82$  *tip vortex* berkurang karena perbedaan tekanan antara *upper side* dan *lower side* tidak sebesar potongan  $x/c = 0.5$ . Hal ini dikarenakan adanya roda di belakang *spoiler* yang menghambat laju udara.

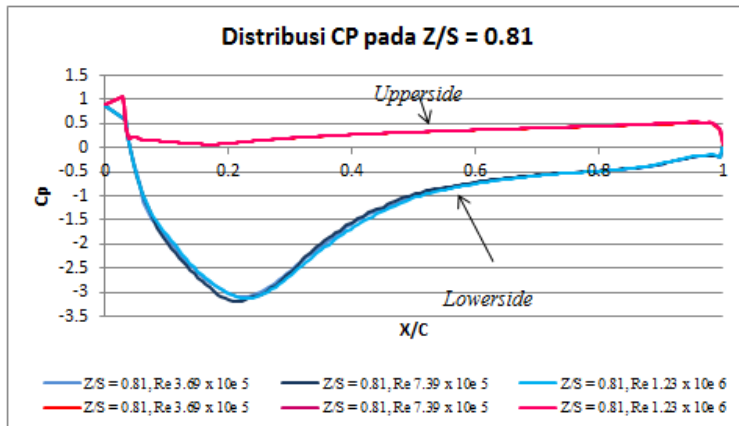
Fenomena ini mengakibatkan berkurangnya *plane area* yang akan menurunkan gaya *downforce*. Meskipun efek ini tidak bisa dihilangkan, cara yang sering ditempuh untuk mengurangi efek ini adalah dengan menambahkan *endplate*, *wing tip*, maupun *winglet* di ujung *airfoil*.

#### 4.4.3 Analisa gaya lift pada spoiler

Salah satu *post processing* pada perangkat lunak komersial ini adalah gaya *lift*. Lebih lanjut lagi, untuk mendapatkan koefisien *lift* (Cl) untuk tiap *Reynolds number* digunakan persamaan (2.17). Gambar 4.14 di bawah ini menunjukkan grafik distribusi  $C_p$  pada *upper side* dan *lower side* pada potongan  $z/s =$



0.81 untuk ketiga *Reynolds number*. Gaya *lift negative* (*downforce*) akan terjadi bila resultan gaya tekan pada *upper side* lebih besar daripada gaya tekan pada *lower side*. Grafik pada gambar 4.14 menunjukkan nilai  $C_p$  pada *upper side* lebih besar daripada nilai  $C_p$  pada *lower side* hampir di semua titik  $x/c$  yang sama.



Gambar 4.14 grafik distribusi  $C_p$  pada *upper side* dan *lower side* pada  $Z/S = 0.81$

Gaya *lift* yang diekstrak dari perangkat lunak komersial adalah gaya *lift* yang bekerja pada *spoiler* saja. Tabel 4.2 berikut menunjukkan besarnya gaya *lift* dan koefisien *lift* dari *spoiler* dengan *plane area*  $0.2526 \text{ m}^2$ .

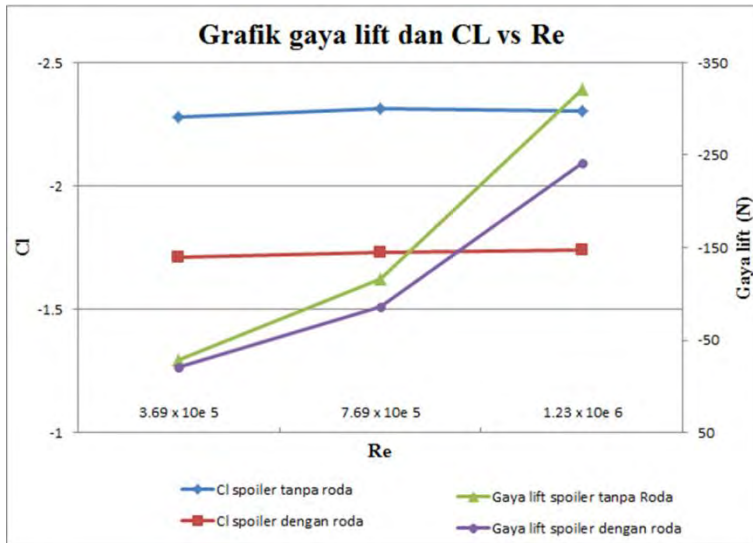
Tabel 4.2 tabel perbandingan  $C_l$  terhadap  $Re$

No	Benda uji	Re $3.69 \times 10^5$		Re $7.69 \times 10^5$		Re $1.23 \times 10^6$	
		Lift (N)	$C_l$	Lift (N)	$C_l$	Lift (N)	$C_l$
1	Spoiler tanpa roda	-28.5838	-2.2808	-116.016	-2.3143	-320.582	-2.3022
2	Spoiler dengan roda	-21.4623	-1.7125	-86.6604	-1.7287	-242.1308	-1.7389
Selisih		24.9%	24.9%	25.3%	25.3%	24.4%	24.4%

Pada *spoiler* tanpa keberadaan roda di belakangnya nilai  $C_l$  tertinggi didapat pada  $Re 7.69 \times 10^5$ . Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh Selig[9] dengan airfoil yang sama tanpa *endplate*,



ground effect, dan roda pada  $Re \times 10^5$  Cl yang dihasilkan adalah 2.23. Adanya *ground effect* memberikan selisih Cl sebesar 0.05.



Gambar 4.15 Grafik gaya lift dan Cl vs Re

Gambar 4.15 menunjukkan grafik perbandingan Cl antara *spoiler* dengan roda dan tanpa roda untuk Re yang sama. Tidak ada perbedaan Cl yang signifikan antar *Reynold number* untuk kasus yang sama.

Pada kasus *spoiler* dengan roda di belakangnya nilai Cl tertinggi dihasilkan pada  $Re \times 10^6$  yaitu -1.738. Terjadi perbedaan nilai Cl di kisaran 25% untuk tiap *Reynolds number*. Perbedaan ini diakibatkan oleh adanya roda di belakang *spoiler*. Roda di belakan *spoiler* menghambat aliran udara di sisi *lowerside spoiler*, sehingga kecepatan udara tidak sebesar aliran udara pada *spoiler* tanpa roda. Tekanan akan meningkat dengan berkurangnya kecepatan. Seperti yang kita ketahui, gaya *lift* yang bekerja pada *spoiler* adalah resultan antara gaya tekan yang bekerja pada *upperside* dan *lowerside*. Jadi, resultan gaya *lift*



*negative (downforce)* pada spoiler dengan roda lebih kecil dibanding resultan *downforce* pada spoiler tanpa roda.

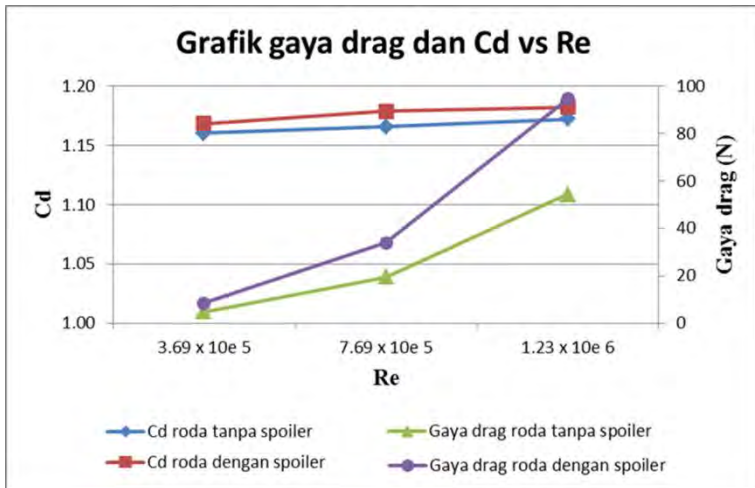
Jika data tersebut diolah lebih lanjut dengan *plotting* data  $Cl$  vs kecepatan, maka akan diperoleh persamaan regresi *linear*  $y = -0.00003x - 1.7139$ . Variabel  $x$  adalah kecepatan. Sehingga prediksi nilai  $Cl$  pada kecepatan 11.11 m/s adalah -1.720. Besarnya *downforce* dihitung menggunakan persamaan (2.17), sebesar -32.848 N. Nilai tersebut lebih kecil dari perhitungan teoritis yang diharapkan menghasilkan *downforce* sebesar 40.11 N. Perbedaan ini disebabkan oleh *blockage effect* roda di belakang *spoiler*.

#### 4.4.4 Analisa gaya *drag* pada *spoiler*

Salah satu *post processing* pada perangkat lunak komersial ini adalah gaya *drag*. Lebih lanjut lagi, untuk mendapatkan koefisien *drag* ( $Cd$ ) untuk tiap *Reynolds number* digunakan persamaan (2.14). Gaya *drag* yang diekstrak dari *perangkat lunak komersial* adalah gaya *drag* yang bekerja pada *spoiler* dan roda. Tabel 4.3 berikut menunjukkan perbandingan besarnya gaya *drag* dan koefisien *drag* dari spoiler dengan *frontal area* 0.145 m<sup>2</sup> dan roda berputar dengan *frontal area* 0.084 m<sup>2</sup>.

Tabel 4.3 tabel perbandingan gaya *drag* dan  $Cd$  roda tanpa spoiler dan spoiler dengan roda

No	Benda uji	Re 3.69 x 10e 5		Re 7.69 x 10e 5		Re 1.23 x 10e 6	
		Drag (N)	Cd	Drag (N)	Cd	Drag (N)	Cd
1	Roda tanpa spoiler	4.8347	1.1603	19.428	1.1657	54.2682	1.1722
2	Roda dengan spoiler						
	Roda	2.6686	1.1683	11.0808	1.1786	31.2481	1.1823
	Spoiler	5.7359		22.8333		63.2582	
	Total	8.4045	1.1683	33.9141	1.1786	94.5063	1.1823
	Selisih	73.83%	0.68%	74.56%	1.10%	74.14%	0.86%



Gambar 4.16 Grafik gaya drag dan Cd vs Re

Dari grafik tabel 4.3 dan grafik pada gambar 4.16 dapat dilihat bahwa gaya drag yang dihasilkan oleh roda tanpa spoiler maupun spoiler dengan roda naik seiring dengan naiknya Reynolds number. Gaya drag yang dihasilkan oleh spoiler dengan roda di belakangnya selalu lebih besar dibandingkan dengan gaya drag yang dihasilkan roda tanpa spoiler di depannya. Begitupun demikian dengan nilai koefisien drag (Cd) untuk keduanya. Meskipun kontribusi gaya drag yang dihasilkan oleh roda pada spoiler dengan roda lebih kecil daripada gaya drag pada roda tanpa spoiler di belakangnya, gaya drag yang besar justru dihasilkan oleh spoiler. Pada kasus spoiler dengan roda di belakangnya, kontribusi gaya drag yang dihasilkan oleh spoiler adalah sekitar 67% untuk ketiga Reynolds number.

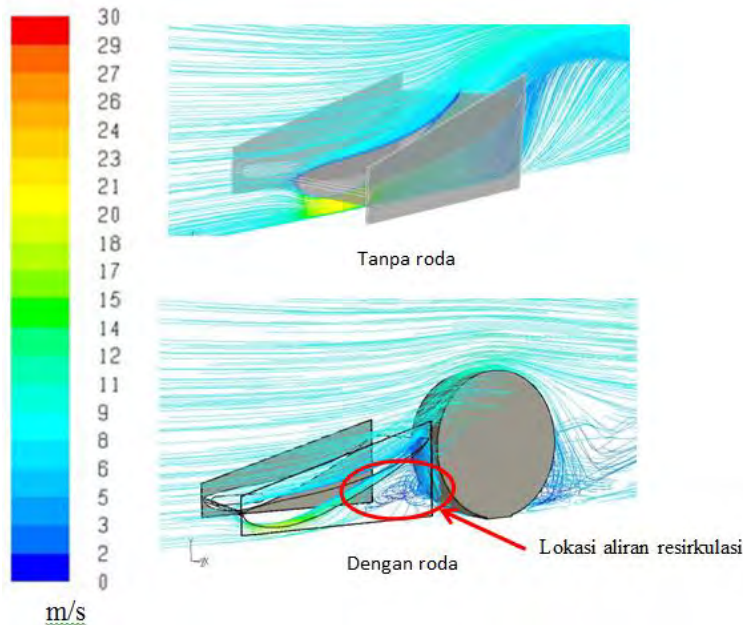
#### 4.4.5 Analisa medan aliran melalui roda

Mortel [2], pada penelitian yang serupa telah menjelaskan aliran melalui roda berputar tanpa ada pengganggu di depannya. Jika roda berputar di atas tanah, titik stagnasi akan bergeser mendekati tanah karena putaran roda. Selain itu akan timbul aliran resirkulasi di bawah titik stagnasi. Gambar 4.17 menunjukkan





*pathlines* dan *vektor* kecepatan aliran udara resirkulasi di bawah *lowerside* depan roda sebagai hasil simulasi penelitian ini.



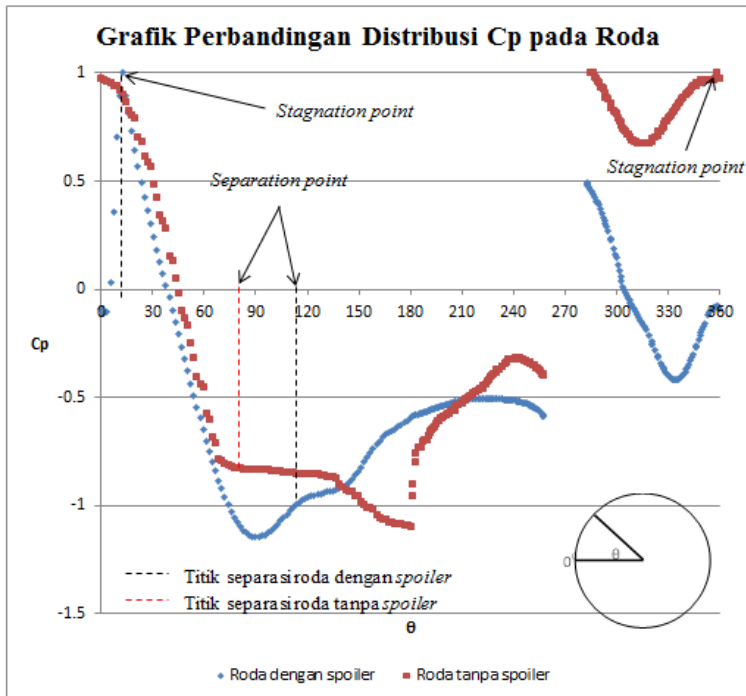
Gambar 4.17 Visualisasi *pathline* aliran resirkulasi di depan roda

Setelah melewati aliran resirkulasi seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.17 udara akan keluar melalui sisi kanan dan kiri roda. Fenomena terjadi akibat keberadaan roda di belakang *spoiler*. Fenomena ini tidak akan muncul pada *spoiler* tanpa roda dilihat pada gambar 4.6. Di sisi *upperside* roda, aliran udara tidak berbeda jauh dengan aliran melewati silinder sirkular, yaitu dipercepat sampai  $\theta$  tertentu setelah melewati titik stagnasi kemudian diperlambat hingga terjadi separasi.

Setelah melalui *trailing edge spoiler*, aliran udara akan melalui roda yang berputar. Aliran udara dari *trailing edge spoiler* menumbuk bagian tertentu dari roda yang kemudian akan membentuk *stagnation point* pada  $\theta = 12.59^\circ$  yang juga ditunjukkan pada gambar 4.17. *Stagnation point* ditunjukkan oleh



$C_p$  yang bernilai 1. Stagnation point terbentuk karena tumbukan udara dengan roda sampai kecepatan nol, bukan karena friksi. Setelah melewati *stagnation point*, aliran udara mengalami percepatan di atas roda sampai  $\theta = 91.8^\circ$  kemudian diperlambat lagi hingga terjadi *separation point* pada kisaran  $\theta = 110^\circ$  yang juga ditunjukkan pada gambar 4.18 (a). Separasi terjadi karena aliran udara tidak mampu menahan tekanan yang terus meningkat sepanjang *upperside* roda. Grafik distribusi  $C_p$  pada aliran *inviscid* akan memberentuk simetri. Sedangkan pada aliran *viscous*, separasi ditandai dengan deviasi pada grafik distribusi  $C_p$ . Gambar 4.18 merupakan distribusi  $C_p$  pada *upperside* roda dan *lowside* roda.



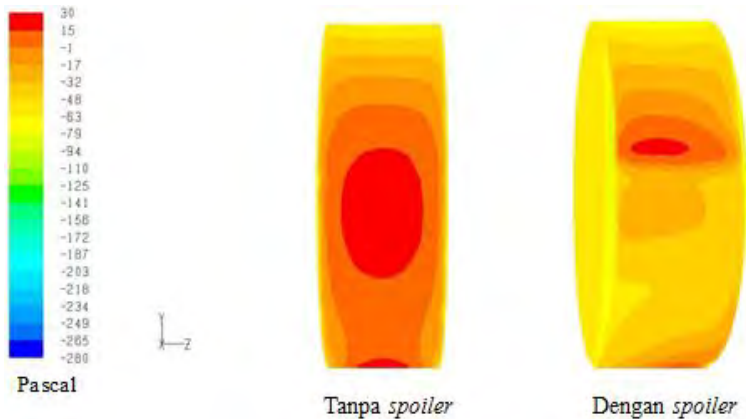
Gambar 4.18 Grafik perbandingan distribusi  $C_p$  pada midspan roda pada  $Re\ 3.69 \times 10^5$





Posisi *stagnation point* pada roda berputar di belakang *spoiler* seperti pada penelitian ini berbeda dengan posisi *stagnation point* pada roda berputar tanpa ada pengganggu apapun di sekitarnya. *Stagnation point* pada roda dengan *spoiler* di depannya memiliki *stagnation point* yang bergeser ke atas karena alirain udara diarahkan melalui *airfoil* dengan sudut serang  $18^\circ$ . Sedangkan *stagnation point* untuk roda tanpa *spoiler* berada di kisaran  $\theta = 350^\circ$ , bergeser ke bawah akibat putaran roda.

Sama halnya dengan *stagnation point*, posisi *separation point* untuk kedua benda uji juga berbeda. *Separation point* terjadi karena momentum aliran tidak dapat melawan *adverse pressure gradient* di sisi *upper side* roda. Pada aliran *inviscid*, grafik distribusi  $C_p$  akan berbentuk grafik sinusoidal, sedangkan pada aliran *viscous* adanya deviasi dari grafik sinusoidal ini menunjukkan titik separasi. Keberadaan *spoiler* di depan roda memperlambat terjadinya separasi karena momentum aliran masih cukup kuat untuk menahan *pressure* sampai kisaran  $\theta = 110^\circ$ . Namun, momentum aliran melewati *upper side* roda tanpa *spoiler* tidak begitu kuat melawan *pressure* sehingga terjadi separasi pada kisaran  $\theta = 70^\circ$ . Penundaan separasi pada roda dengan *spoiler* berkaitan dengan pergeseran *stagnation point* ke sudut  $\theta = 12.59^\circ$  yang diakibatkan oleh keberadaan *spoiler* di depan roda.



Gambar 4.19 Visualisasi kontur tekanan pada roda berputar pada  $Re = 7.39 \times 10^5$

Gambar 4. 19 menunjukkan visualisasi kontur tekanan pada roda dengan *spoiler* dan roda tanpa *spoiler*. Lokasi daerah bertekanan tinggi yang diprediksi lokasi titik stagnasi pada roda berputar tanpa ada *spoiler* di sepannya berada di bawah sumbu roda. Hal ini sesuai dengan penelitian **Mortel [2]**. Sedangkan daerah bertekanan tinggi pada roda berputar yang berada di belakang *spoiler* berada di atas sumbu roda, tepatnya hampir sejajar dengan *trailing edge spoiler*.



*(halaman ini sengaja dikosongkan)*



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Hasil analisa yang didapat dari simulasi karakteristik aliran 3 dimensi melalui *spoiler* depan mobil formula sae dengan variasi *Reynolds number* adalah sebagai berikut :

1. Variasi *Reynolds number* tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap distribusi  $C_p$  ditinjau dari perbandingannya pada potongan  $z/s = 0.25$ ,  $z/s = 0.5$ , dan  $z/s = 0.81$ .
2. Variasi *Reynolds number* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap *downforce* yang dihasilkan, semakin besar *Reynolds number* maka *downforce* yang dihasilkan semakin besar. Namun, pengaruh *Reynolds number* terhadap koefisien *lift* ( $C_l$ ) tidak signifikan.
3. Variasi *Reynolds number* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap gaya *drag* yang dihasilkan, semakin besar *Reynolds number* maka gaya *drag* yang dihasilkan semakin besar. Namun, pengaruh *Reynolds number* terhadap koefisien *drag* ( $C_d$ ) tidak signifikan.
4. Titik stagnasi pada *spoiler* bergeser ke  $x/c = 0.018$  pada *upperside*. Titik stagnasi dapat dilihat dari visualisasi kontur tekanan pada *spoiler* dengan warna merah.
5. Visualisasi *pathlines* melalui *lowerside* menunjukkan adanya aliran resirkulasi sebelum keluar melalui samping kanan kiri roda. Keberadaan roda mengakibatkan *blockage effect* sehingga pola aliran ini terbentuk.
6. Titik stagnasi pada roda mengalami pergeseran menjauhi tanah. Pergeseran titik stagnasi diakibatkan oleh keberadaan *spoiler* di depannya sehingga posisi titik stagnasi berada di belakang *trailing edge spoiler*.
7. *Blockage effect* mengakibatkan penurunan laju aliran udara di *lowerside* sehingga mengurangi *downforce* yang dihasilkan oleh *spoiler*.



8. *Tip vortices* terjadi akibat perbedaan tekanan pada *upper side* sebagai *pressure side* dan *lower side* sebagai *suction side*. Kuatnya *tip vortices* pada daerah di belakang  $x/c = 0.5$  ditunjukkan dengan banyaknya *vector* kecepatan yang menuju *lower side*.

## 5.2 Saran

Beberapa saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian dan diharapkan berguna untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut :

9. *Meshing* yang baik akan menentukan kualitas dari visualisasi kontur, *vector*, maupun *pathlines* sebagai pendukung data kuantitatif.
1. Perbedaan nilai *Cl* yang dihitung secara teoritis dan hasil simulasi mengharuskan adanya desain ulang *spoiler* depan menjadi *multi-element airfoil* karena batasan aturan FSAE.
2. Untuk mendapatkan keakuratan data kuantitatif dan kualitatif maka perlu mempertimbangkan adanya bodi mobil dalam permodelan.



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wordley, Scott and Saunders, Jeff. 2006. *Aerodynamics for Formula SAE: A Numerical, Wind Tunnel and On-Track Study*. Monash, Australia. SAE paper 2006-01-0808
- [2] Mortel F. 2003. *Cranfield Team F1 : The Front Wing*. MSc Thesis. Cranfield, USA.
- [3] Rahhman, Arif Aulia. 2014. *Simulasi Numerik Pengaruh Multi-Element Airfoil Terhadap Lift dan Drag pada Spoiler Belakang Mobil Formula Sae dengan Variasi Angle Of Attack*. Surabaya.
- [4] Fox, Robert W, McDonald and Alan T. 2003. *Introduction to Fluid Mechanics 6th edition*. USA.
- [5] Katz, Joseph. 1995. *Race Car Aerodynamics : Designing For Speed*. Massachusetts.
- [6] Prakoso, Anindito Bagus. 2011. *Studi Numerik Karakteristik Aliran 3 Dimensi Disekitar Model Sapuwing Dengan Rasio Ground Clearance Terhadap Panjang Model ( $C/L = 0.027$ )*. ITS Surabaya, Indonesia.
- [7] Douglas, John W, Gasiorek, Janusz M, Swaffield, John A, and Jack, Lynne B. 2005. *Fluid Mechanisc fifth edition*. United Kingdom.
- [8] Yuliyu, Diaul Vikri. 2014. *Simulasi Numerik Karakteristik Aliran 3 Dimensi Di Sekitar Bodi "Sapuwing Speed" dengan Rasio Ground Clearance Terhadap Panjang Model ( $C/L$ ) 0.014*. Surabaya.
- [9] Selig, Michael S., and Guglielmo, James J. 1997. *High-Lift Low Reynolds Number Airfoil Design*. Illionis, Journal of Aircraft vol. 34, No 1, January-February 1997. USA.
- [10] ITS Team Sapuwing. 2014. *FSAE Design Spec Sheet 2014*. Surabaya, Indonesia.



- [11] Berg, Martinus Anthoon van den. 2007. *Aerodynamic Interaction of an Inverted Wing with a Rotating Wheel*. PhD Thesis. Southampton, UK.
- [12] Zhang, Xin and Zerihan Jonathan. 2000. *Aerodynamics of a Single Element Wing in Ground Effect*. Journal of Aircraft vol. 37, No 6, November-December 2000. Southampton, United Kingdom.
- [13] Fackrell, J.E. and Harvey J.K. *The Flow and Distribution of an Isolated Road Wheel*. 1973. *Advance in Road Vehicle Aerodynamic*. BHRA Fluid Engineering.
- [14] Nicholas J, Mulvany, Chen, Li, Tu, Jiyuan, and Anderson, Brendon. 2004. *Steady State Evaluation of 'Two-Equation' RANS Turbulence Models Simulation for High-Reynolds Number Hydrodynamic Flow*. DSTO Platform Division, Australia.
- [15] Milliken, Douglas L, et al. 1995. *Race Car Vehicle Dynamic*. USA



## **Tentang Penulis**



Wahyu Nugroho dilahirkan di Kabupaten Purworejo, Jawa Tengah pada 22 Juli 1992 yang merupakan anak pertama dari dua bersaudara.

Penulis telah menempuh pendidikan Sekolah Dasar di SDN 1 Maron (1998-2004), Sekolah Lanjutan Tingkat Pertama di SMPN 2 Purworejo (2004-2007), Sekolah Menengah Atas di SMAN 1 Purworejo (2007-2010). Setelah lulus dari bangku SMA, penulis melanjutkan pendidikannya di Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, sebagai mahasiswa S1 (2010-2015).

Selama menempuh pendidikan di bangku kuliah, penulis banyak mengikuti kegiatan organisasi di dalam kampus. Penulis pernah menjabat sebagai staff divisi Umum di Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin dan sebagai Kepala Divisi *Body* di ITS Tim Sapuangin 2014. Penulis pernah mengikuti kepesertaan sebagai panitia pada acara yang diadakan oleh LBMM maupun Himpunan Mahasiswa Mesin.